



Universidad
Carlos III de Madrid

Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras

TRABAJO FIN DE GRADO

ESTUDIO NUMÉRICO DEL IMPACTO ASIMÉTRICO EN PLACAS DE POLICARBONATO CON ENTALLA SIMPLE

GRADO EN INGENIERÍA MECÁNICA

Autor: Daniel Chumillas García

Tutor: Josué Aranda Ruiz

Director: Álvaro Olmedo Marcos

Leganés, 06 de julio de 2015.

AGRADECIMIENTOS

Tras años de esfuerzo, trabajo y dedicación, con este proyecto finaliza una gran etapa de mi vida. No quisiera finalizar este periodo sin dar las gracias a todos aquellos que lo han hecho posible.

En primer lugar me gustaría agradecer a la educación pública española la oportunidad de formación que me ha brindado, en especial a la Universidad Carlos III de Madrid. Hacer especial mención a Antonio Custodio, quien puso las primeras piedras que sentaron las bases de mi formación. Dar las gracias a mi tutor de proyecto Josué Aranda Ruiz por su dedicación y ayuda sin la cual no hubiera sido posible el desarrollo de este proyecto. Así mismo, agradecer a todos y cada uno de los profesores y compañeros que de una u otra forma han contribuido a mi desarrollo en la Universidad.

Gracias a mis amigos Alejandro, Javier, Susana y Sergio por haber estado ahí siempre que os he necesitado, por las largas épocas de biblioteca y por los buenos momentos vividos en estos años.

Gracias a ti Beatriz, por estar siempre a mi lado, tanto en los buenos como en los malos momentos, y gracias por todos estos años en los que me has ayudado a crecer tanto en lo profesional como en lo personal. Te quiero.

Por último, dar las gracias con especial cariño a mi familia, en especial a mi hermana y a mis padres. Por vuestro apoyo incondicional y confianza, porque si he conseguido llegar hasta aquí es sin duda alguna gracias a vosotros.

ABSTRACT

Nowadays, the use of polycarbonate has become very popular due to his good relationship between mechanical properties with respect to his weight and cost. Polycarbonate is one of the materials with better behaviour under impact loads so it is a good choice to applications such as glazing, barriers and PPEs (personal protective equipments).

As a consequence of these applications, different failure modes have been observed on polycarbonate plates producing crack propagations on the material. The competition between the different failure modes and the different parameters and conditions produces different behaviours of the polycarbonate.

This project reaches the numerical study of the failure modes observed in polycarbonate notched specimens under impact loads. In the study, using Abaqus (software based on the Finite Element Method), a full three-dimensional numerical model has been build to reproduce tests made on polycarbonate simple notched specimens.

Thanks to this study it is possible to know the influence of the different parameters and conditions on the failure modes observed on the polycarbonate under impact conditions.

Keywords: polymer; polycarbonate; impact load; failure mode; FEM; numerical model.

RESUMEN

En la actualidad, la utilización del policarbonato ha cobrado ventaja sobre la de otros materiales debido a sus buenas propiedades mecánicas en relación con su peso y coste. Debido a que el policarbonato es uno de los polímeros termoplásticos más resistentes al impacto que existen lo convierte en una alternativa segura para acristalamientos, protecciones y barreras.

Como consecuencia de estas aplicaciones, durante los impactos que pueda sufrir el material, se producen fisuras en el mismo. Dichas fisuras pueden producirse debido a diferentes modos de fallo, como por ejemplo, el modo de fallo frágil y modo de fallo dúctil. A su vez las fisuras pueden propagarse en distintas direcciones y el material puede comportarse de distinta forma en función de ciertos parámetros y condiciones.

Este proyecto abarca el estudio numérico del impacto asimétrico en placas de policarbonato con entalla simple. En dicho estudio se analizan los distintos modos de fallo así como la influencia de los distintos parámetros del problema tales como espesor de la probeta, velocidad de impacto y altura de impacto. Para ello se ha empleado el software comercial Abaqus, basado en el método de elementos finitos (MEF), gracias al cual se ha desarrollado un modelo numérico para el problema expuesto.

Gracias a este estudio es posible conocer la influencia de los parámetros del impacto en el fallo del policarbonato así como conocer el comportamiento frente a impacto del mismo sin necesidad de realizar ensayos experimentales.

Palabras clave: polímero; policarbonato; impacto; modo de fallo; MEF; modelo numérico.

ÍNDICE GENERAL

1. INTRODUCCIÓN	9
1.1. Motivación	9
1.2. Objetivos	10
1.3. Presupuesto	12
1.4. Estructura de la memoria	15
2. ESTADO DEL ARTE	16
2.1. Policarbonato	16
2.2. Modelos constitutivos	19
2.3. Modelos de daño	25
3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE VALIDACIÓN	27
3.1. Procedimiento	28
3.2. Resultados	28
4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO	30
4.1. Modelo constitutivo	30
4.1.1. Relación constitutiva utilizada para el policarbonato	30
4.2. Modelo de daño	33
4.2.1. Modelo de daño frágil	33
4.2.2. Modelo de daño dúctil	34
4.3. Modelo numérico	35
4.3.1. Introducción al método de elementos finitos (MEF)	35
4.3.2. Introducción a Abaqus	37
4.3.3. Desarrollo del modelo numérico del proyecto	39
5. RESULTADOS	53
5.1. Validación del modelo	54
5.2. Influencia de los parámetros del problema sobre la vel. deformación	56
5.3. Análisis de los distintos modos de fallo	62
6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS	71
7. BIBLIOGRAFÍA	74

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Cubierta de policarbonato del Estadio Olímpico de Atenas.....	9
Figura 2. Estructura molecular del policarbonato.....	16
Figura 3. Fabricación de CDs con lámina protectora de policarbonato.....	16
Figura 4. Lentes de polimetilmetracrilato	17
Figura 5. Ejemplo de aplicación del policarbonato: careta protectora.....	18
Figura 6. Modelos constitutivos e interrelación entre las disciplinas que le dan origen.	19
Figura 7. Clasificación de los modelos constitutivos.....	20
Figura 8. Representación esquemática del Modelo de Maxwell	21
Figura 9. Representación esquemática del Modelo de Kelvin-Voigt	22
Figura 10. Representación esquemática del Modelo de Arruda-Boyce.....	24
Figura 11. Representación del principio de deformación equivalente.....	25
Figura 12. Representación del principio de tensión equivalente	26
Figura 13. Geometría del impacto para el ensayo de Ravi Chandar.....	27
Figura 14. Propagación de grieta en los ensayos de Ravi Chandar	29
Figura 15. Tensión verdadera frente a deformación verdadera o logarítmica.....	30
Figura 17. Relación tensión-deformación con densidades de energía.....	34
Figura 18. Modelización proyectil y probeta	39
Figura 19. Vista isométrica del proyectil	40
Figura 20. Cotas del proyectil	40
Figura 21. Vista isométrica de la probeta.....	41
Figura 22. Cotas de la probeta	42
Figura 23. Detalle de la entalla simple.....	42
Figura 24. Definición del comportamiento plástico del policarbonato en Abaqus	44
Figura 25. Condiciones iniciales del modelo numérico: temperatura y velocidad.....	45
Figura 26. Movimiento en función de los ejes del modelo	45
Figura 27. Condiciones de simetría del modelo	46
Figura 28. Coacciones externas de la probeta	46
Figura 29. Cubo lineal de 8 nodos C3D8R	47
Figura 30. Ejemplo de borde sembrado	47

Figura 31. Mallado del proyectil	48
Figura 32. Particiones realizadas sobre la probeta.....	48
Figura 33. Detalle de las particiones realizadas en la zona próxima a la entalla.....	49
Figura 34. Mallado de la probeta	50
Figura 35. Detalle del mallado en el espesor de la probeta.....	50
Figura 36. Detalle del mallado en la zona próxima a la entalla.....	51
Figura 37. Módulo <i>job</i> con los distintos modelos que componen los casos	52
Figura 38. Modo de fallo frágil. Resultado numérico y resultado experimental.....	55
Figura 39. Modo de fallo dúctil. Resultado numérico y resultado experimental	55
Figura 40. Zona del extremo de la entalla para el cálculo de velocidad de deformación.....	56
Figura 41. Caso representativo de Comportamiento Tipo A (B6_h15_V60)	64
Figura 42. Caso representativo de Comportamiento Tipo B (B6_h0_V40)	64
Figura 43. Caso representativo de Comportamiento Tipo C (B10_h15_V120).....	65
Figura 44. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=6mm y V=60m/s	65
Figura 45. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=10mm y V=80m/s.....	66
Figura 46. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=15mm y V=80m/s.....	66
Figura 47. Deformación plástica caso B6_h0_V60	67
Figura 48. Variación de temperatura del elemento número 114532.....	68
Figura 49. Deformación plástica caso B6_h5_V80	68
Figura 50. Variación de temperatura del elemento número 112410.....	69
Figura 51. Deformación plástica caso B10_h0_V80	69
Figura 52. Variación de temperatura del elemento número 2006	70

ÍNDICE DE TABLAS Y GRÁFICAS

TABLAS

Tabla 1. Listado de horas dedicadas al proyecto	12
Tabla 2. Tabla esquemática del presupuesto	13
Tabla 3. Valores de los parámetros de los modelos Drucker-Prager y Burzynski-Torre	23
Tabla 4: Propiedades mecánicas del policarbonato	43
Tabla 5: Definición elástica del policarbonato en el modelo numérico	43
Tabla 6. Datos del sembrado en los bordes de las distintas particiones.....	49
Tabla 7. Datos del mallado de los elementos	51
Tabla 8. Listado de los distintos casos analizados.....	54
Tabla 9. Velocidad de deformación en los distintos casos analizados	57
Tabla 10. Casos sin fractura del material	62
Tabla 11. Casos con aparición de modo de fallo frágil.....	63
Tabla 12. Casos con aparición de modo de fallo dúctil	67

GRÁFICAS

Gráfica 1. Relación constitutiva utilizada para el policarbonato.....	32
Gráfica 2. Tensión principal máxima en función de la velocidad de deformación	33
Gráfica 3. Relación entre espesor de probeta, altura de impacto y velocidad de deformación para velocidad de impacto 80 m/s	58
Gráfica 4. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 6 mm	59
Gráfica 5. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 10 mm	60
Gráfica 6. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 15 mm	61
Gráfica 7. Variación del ángulo de propagación con la altura de impacto	66

1. INTRODUCCIÓN

1.1. Motivación

Desde que se inventaron los materiales poliméricos, hace más de un siglo, éstos han revolucionado nuestro modo de vida. No importa si nos estamos comunicando, de viaje, cuidando de nuestra salud o protegiendo el medioambiente; no hay ámbito de la actividad humana que no se haya visto influido por la utilización de estos materiales. Científicos y tecnólogos trabajan en aspectos dispares para que los polímeros sigan sustituyendo antiguos materiales y mejorando la vida de las personas.

En concreto las placas de policarbonato han cobrado ventaja sobre el vidrio o el acero inoxidable. Su buena transmisión de la luz, su gran dureza, su aislamiento térmico y su adaptación a cualquier superficie hacen de la construcción, la industria o el hogar, ejemplo del amplio abanico de posibilidades para su uso y aplicación.

Cabe destacar que las placas de policarbonato son uno de los materiales poliméricos termoplásticos transparentes más resistentes al impacto que existen, soportando impactos de piedras, herramientas e incluso balas, sin resquebrajarse. Esto lo convierte en una alternativa segura para ciertas aplicaciones como acristalamientos, protecciones y barreras.



Figura 1. Cubierta de policarbonato del Estadio Olímpico de Atenas

Debido a las aplicaciones que tiene el policarbonato surge la necesidad de analizar sus propiedades y cuantificar su comportamiento frente al impacto. Para ello, comúnmente, se han realizado ensayos experimentales de impacto, tanto utilizando el péndulo de Charpy [1] como utilizando cañones neumáticos para el lanzamiento de proyectiles.

Para que estos ensayos sean fiables es necesario realizar probetas del material siguiendo exactamente el mismo proceso de fabricación que se utiliza para la realización de las piezas (proceso productivo, preparación superficial, condiciones ambientales, etc.). Dicho proceso de fabricación unido al hecho de que las probetas no se pueden volver a reutilizar una vez ensayadas aumenta el coste del ensayo.

Por otro lado, con los procedimientos experimentales no se logra identificar de manera directa el estado de la zona donde se produce el fallo del material.

Por todo ello, aparece la necesidad de sustituir los análisis experimentales con otro tipo de análisis más eficientes. Esta es la razón que nos lleva a abordar el análisis numérico del impacto asimétrico en placas de policarbonato que se trata en este proyecto.

1.2. Objetivos

Como se ha podido observar en la introducción, este proyecto consiste en el análisis numérico de los resultados de un impacto asimétrico producido por un proyectil cilíndrico contra una probeta plana con entalla simple, ambos elementos fabricados en policarbonato. Dicho análisis se lleva a cabo utilizando el software de elementos finitos Abaqus.

1.2.1. Objetivo principal

El objetivo principal es cuantificar la influencia de los distintos parámetros del problema (velocidad de impacto, altura de impacto, espesor de probeta, etc.) sobre la rotura y los diferentes modos de fallo que aparecen en la probeta de policarbonato. Para ello será necesaria la consecución de un modelo numérico válido para el comportamiento del policarbonato frente a impacto.

1.2.2. Objetivos secundarios

Como objetivos secundarios o auxiliares encontramos:

- Desarrollo y aplicación del modelo constitutivo del problema. Este debe ser capaz de describir el comportamiento físico macroscópico del sólido aplicando hipótesis simplificadoras al sólido real.
- Aplicación de un modelo de daño adecuado a las características del material y del problema.
- Desarrollo del modelo numérico del problema utilizando el código comercial de elementos finitos Abaqus/Explicit prestando especial atención en el mallado óptimo del modelo.

Una vez conocidos los objetivos, tras la realización del proyecto se deberá conocer y obtener:

- Un modelo numérico válido, que represente fielmente el comportamiento del policarbonato frente a impacto.
- La influencia de la velocidad de impacto, altura de impacto y espesor de la probeta en el desarrollo de la rotura de la misma.
- Las posibles líneas de desarrollo para trabajos futuros.

1.3. Presupuesto

El presente proyecto comenzó el día 02/02/2015 y ha finalizado el día 12/06/2015 teniendo una duración aproximada de 5 meses. El número de horas dedicadas al proyecto durante este periodo ha sido un total de 452 horas. La planificación detallada del proyecto se muestra en la siguiente tabla.

1.3.1. Tabla esquemática del presupuesto

TAREA	FECHA INICIO DE TAREA	FECHA FIN DE TAREA	H/DIA	DIAS	TOTAL HORAS
1. Propuesta	02/02/2015	02/02/2015	1	1	1
2. Inicio del proyecto	06/02/2015	06/02/2015	1	1	1
3. Planificación del proyecto	06/02/2015	06/02/2015	4	1	4
4. Ejecución del proyecto	09/02/2015	10/04/2015			
4.1. Aprendizaje del software Abaqus	09/02/2015	13/02/2015	6	4	24
4.2. Simulación de casos en Abaqus	16/02/2015	27/03/2015	7	30	210
4.3. Postprocesado de datos y conversión a Excel	27/03/2015	30/03/2015	5	3	15
4.4. Representación gráfica de datos	02/04/2015	04/04/2015	4	2	8
4.5. Análisis y comparación de resultados	06/04/2015	10/04/2015	6	4	24
5. Redacción de la memoria	24/04/2015	16/06/2015			
5.1. Maquetación inicial, portada y agradecimientos	24/04/2015	24/04/2015	2	1	2
5.2. Resumen y Abstract	30/04/2015	01/05/2015	2	2	4
5.3. Capítulo 1	04/05/2015	05/05/2015	5	2	10
5.4. Capítulo 2	06/05/2015	10/05/2015	6	4	24
5.5. Capítulo 3	11/05/2015	14/05/2015	5	4	20
5.6. Capítulo 4	15/05/2015	28/05/2015	6	10	60
5.7. Capítulo 5	29/05/2015	03/06/2015	5	4	20
5.8. Capítulo 6	04/06/2015	06/06/2015	5	2	10
5.9. Bibliografía	08/06/2015	11/06/2015	3	4	12
6. Maquetación final	12/06/2015	12/06/2015	3	1	3
TOTAL HORAS					452

Tabla 1. Listado de horas dedicadas al proyecto


		PRESUPUESTO DE PROYECTO			
		UNIVERSIDAD CARLOS III DE MADRID			
		Departamento de mecánica de medios continuos y teoría de estructuras			
NOMBRE DEL PROYECTO		ESTUDIO NUMÉRICO DEL IMPACTO ASIMÉTRICO EN PLACAS DE POLICARBONATO CON ENTALLA SIMPLE			
PROYECTISTA		DANIEL CHUMILLAS GARCÍA			
COSTE DE RECURSOS HUMANOS					
APELLIDOS, NOMBRE	FUNCION DESEMPEÑADA	CATEGORÍA	DEDICACIÓN ESTIMADA (HORAS)	COSTE / HORA	COSTE
ARANDA RUIZ, JOSUÉ	SUPERVISIÓN DEL PROYECTO	INGENIERO INDUSTRIAL	25	45,00 €	1.125,00 €
CHUMILLAS GARCÍA, DANIEL	REALIZACIÓN DEL PROYECTO	INGENIERO MECÁNICO	452	25,00 €	11.300,00 €
				Subtotal	12.425,00 €
			21,00%	IVA	2.609,25 €
			Total	15.034,25 €	
COSTE DE EQUIPOS					
DETALLE	COSTE DE ADQUISICIÓN (€)	PERIODO DE USO DEL EQUIPO (MESES)	VIDA ÚTIL DEL EQUIPO (AÑOS)	VALOR RESIDUAL	Precio
SOFTWARE ABAQUS 6.12	25.040 €	6	1	0,00 €	12.520,00 €
PAQUETE OFIMÁTICA OFFICE 2010	5.000 €	6	5	0,00 €	500,00 €
ORDENADOR PORTATIL	1.200 €	6	5	120,00 €	108,00 €
				Subtotal	13.128,00 €
				IVA	0,00 €
				Total	13.128,00 €
COSTE FINAL DEL PROYECTO					
COSTE DE LOS RECURSOS HUMANOS					15.034,25 €
COSTE DE EQUIPOS					13.140,00 €
				Total	29.174,25 €

Tabla 2. Tabla esquemática del presupuesto

1.3.2. Detalle de cálculo de costes:

Para el cálculo de los costes de equipos se ha empleado el siguiente procedimiento:

$$C_{Equipos} = \frac{(C_{Adquisición} - V_{residual}) \cdot T_{uso}}{V_{Útil}}$$

Donde:

- $C_{Adquisición}$ = Coste de adquisición del equipo.
- $V_{Residual}$ = Valor residual del equipo.
- T_{Uso} = Periodo de uso, en meses, del equipo durante el presente proyecto.
- $V_{Útil}$ = Vida útil del equipo en meses de utilización.

Se ha establecido un periodo de vida útil de los equipos de 5 años (60 meses), para el ordenador portátil y el Paquete Office.

Para el software Abaqus se ha establecido una vida útil de 1 año (12 meses), coincidiendo con la duración de validez de la licencia del programa.

El ordenador portátil es el único equipo susceptible de tener valor residual. Para él se ha establecido un valor residual del 10% sobre el coste de adquisición.

El impuesto sobre el valor añadido (IVA) del 21% (tipo general), ha sido aplicado al coste de los recursos humanos.

1.4. Estructura de la memoria

El proyecto está estructurado en 7 capítulos:

➤ Capítulo 1

Contiene una breve introducción acerca de los aspectos fundamentales tratados en el proyecto con el fin de contribuir a una mejor comprensión del mismo. En él se define la motivación, objetivos, presupuesto del proyecto y estructura de la memoria.

➤ Capítulo 2

En el segundo capítulo, estado del arte, se exponen los antecedentes tanto en lo referente al policarbonato como a los modelos constitutivos y modelos de daño previos.

➤ Capítulo 3

En este capítulo se exponen los resultados experimentales de validación del estudio en el que se basa la modelización numérica. Principalmente se analiza el trabajo realizado por Ravi-Chandar “On failure mode transitions in polycarbonate under dynamic mixed mode loading” [2].

➤ Capítulo 4

El cuarto capítulo hace referencia a la descripción del modelo. En él, se trata tanto el modelo constitutivo como el modelo de daño.

A su vez se expone el modelo numérico en el que se define tanto la geometría del problema, la definición del material, condiciones de contorno, etc. utilizando el código comercial Abaqus/Explicit.

➤ Capítulo 5

En el quinto capítulo se encuentra el análisis numérico de los resultados del impacto. Principalmente se analiza la influencia de los distintos parámetros del problema (velocidad de impacto, altura de impacto y espesor de probeta) en los modos de fallo que aparecen en la probeta así como en el proceso de propagación de la fisura.

➤ Capítulo 6

En el sexto capítulo se recogen las conclusiones principales y se proponen posibles líneas de desarrollo para trabajos futuros.

➤ Capítulo 7

En el séptimo y último capítulo se encuentra la bibliografía con las referencias a libros, estudios y artículos utilizados para el desarrollo de este proyecto.

2. ESTADO DEL ARTE

2.1. Policarbonato

El Dr. H. Schnell (empleado de Bayer AG, Alemania) y D. W. Fox (empleado de General Electric Company, Estados Unidos) descubrieron en paralelo el policarbonato a principios de los años 50.

El policarbonato (PC) es un termoplástico formado por grupos carbonatos en su cadena principal. Se trata de un plástico amorfo y transparente, con una temperatura de fusión de 150°C y con unas muy buenas propiedades mecánicas y de tenacidad. [3]

Más adelante, en el capítulo 4, se hablará en detalle del modelo constitutivo utilizado en este trabajo para definir el comportamiento del policarbonato.

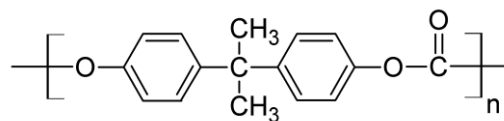


Figura 2. Estructura molecular del policarbonato

Este material se utiliza en aplicaciones comerciales desde finales de los años 50. Se utilizó inicialmente para aplicaciones de electricidad y electrónica, por ejemplo en cajas de conexiones o de fusibles, tableros y conectores de enchufe, y más tarde para cubiertas translúcidas de invernaderos y edificios públicos. Las excelentes propiedades del policarbonato extendieron rápidamente su utilización a muchas otras aplicaciones suponiendo una alternativa para materiales como el vidrio o el polimetilmetacrilato.



Figura 3. Fabricación de CDs con lámina protectora de policarbonato

2.1.1. El Vidrio

El vidrio es un fluido con una muy alta viscosidad, compuesto por una mezcla de óxidos metálicos en la que sus átomos se han encadenado por medio del calor para formar un sistema rígido reticular aleatorio.

Una de las características de mayor importancia es su potencial de resistencia al ataque químico, haciendo de la durabilidad una de sus cualidades principales. Los vidrios son duros pero frágiles, es decir, no son fácilmente rayables pero no resisten bien al golpe. Este inconveniente ha llevado a la historia al uso de materiales plásticos como el metacrilato.

2.1.2. El polimetilmetacrilato (PMMA)

El polimetacrilato de metilo fue patentado en 1933 como un nuevo material plástico transparente capaz de sustituir al vidrio, ya que tiene la ventaja de que no se astilla. A partir de la Segunda Guerra Mundial este plástico fue producido a escala industrial. [4]

Se trata de un termoplástico duro, resistente, transparente, de excelentes propiedades ópticas con alto índice de refracción, buena resistencia al envejecimiento y a la intemperie. Su resistencia a la rotura es siete veces superior a la del cristal a igualdad de espesores, por lo que resulta más resistente a los golpes reduciendo los gastos por rotura y por lo tanto los costes de mantenimiento en sus aplicaciones.



Figura 4. Lentes de polimetilmetacrilato

En cuanto a sus inconvenientes principales cabe destacar su elevado coste, que junto al tipo de estructura requerida hacen que las construcciones con este material sean de costes elevados. En ciertas ocasiones esto nos lleva a considerar la utilización de otros materiales como el policarbonato.

2.1.3. Usos del Policarbonato (PC)

Al ser un material moldeable, ligero y de difícil fractura las placas de policarbonato se usan en casi todos los sectores industriales.

El policarbonato es recurrente en la fabricación de ordenadores, discos compactos, teléfonos móviles, gafas, faros de automóvil, cabinas telefónicas, incubadoras, accesorios náuticos, mamparas protectoras o ventanillas de bancos y escudos policiales, entre otros productos.

A la hora de ahorrar costes en calefacción y luz y ofrecer una mayor seguridad en el hogar, las placas de policarbonato tampoco han pasado desapercibidas en su uso doméstico. Mamparas de ducha, muebles, ventanas, techos, tabiques o electrodomésticos son algunas de sus aplicaciones domésticas.

Cabe destacar que las placas de policarbonato son uno de los polímeros termoplásticos transparentes más resistentes al impacto que existen. Es por ello que el policarbonato es una gran alternativa para ciertas aplicaciones como acristalamientos y barreras de protección.



Figura 5. Ejemplo de aplicación del policarbonato: careta protectora

2.2. Modelos constitutivos

Se denomina modelo constitutivo a una formulación matemática capaz de describir el comportamiento físico macroscópico de un sólido ideal, más concretamente, que relacione las tensiones que soporta un material con las deformaciones que en él se producen. Dicha formulación se consigue aplicando hipótesis simplificativas sobre un sólido real. Por ello se puede decir que la formulación de los modelos constitutivos representa una realidad condicionada a ciertas hipótesis y por lo tanto su utilización debe realizarse consecuentemente con ellas. Existen innumerables modelos constitutivos y se sigue trabajando en la formulación de modelos nuevos, teniendo como objetivo conseguir una formulación suficiente y acorde con el problema que se quiera resolver. Esto es debido a que es prácticamente imposible obtener una solución general que sirva para todos los problemas.

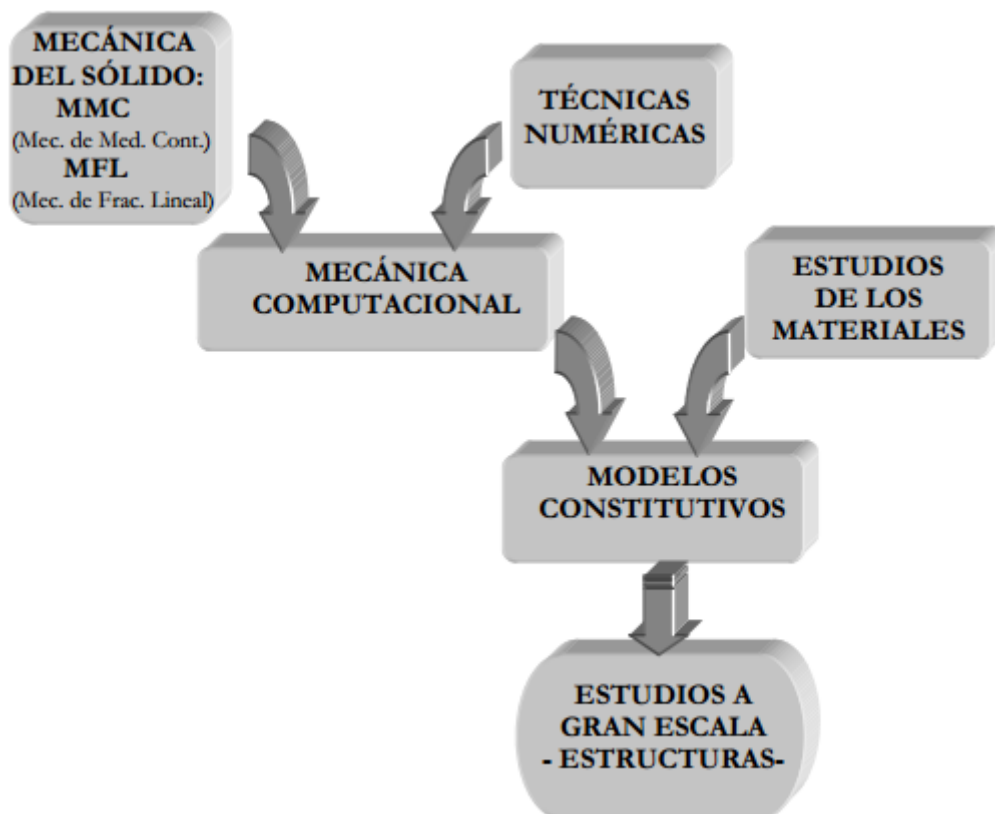


Figura 6. Modelos constitutivos e interrelación entre las disciplinas que le dan origen [5]

A continuación se muestra una posible clasificación de los modelos constitutivos:

- Modelos basados en la elasticidad lineal y no-lineal.
- Modelos basados en la teoría de la plasticidad y daño.
- Modelos de fractura.

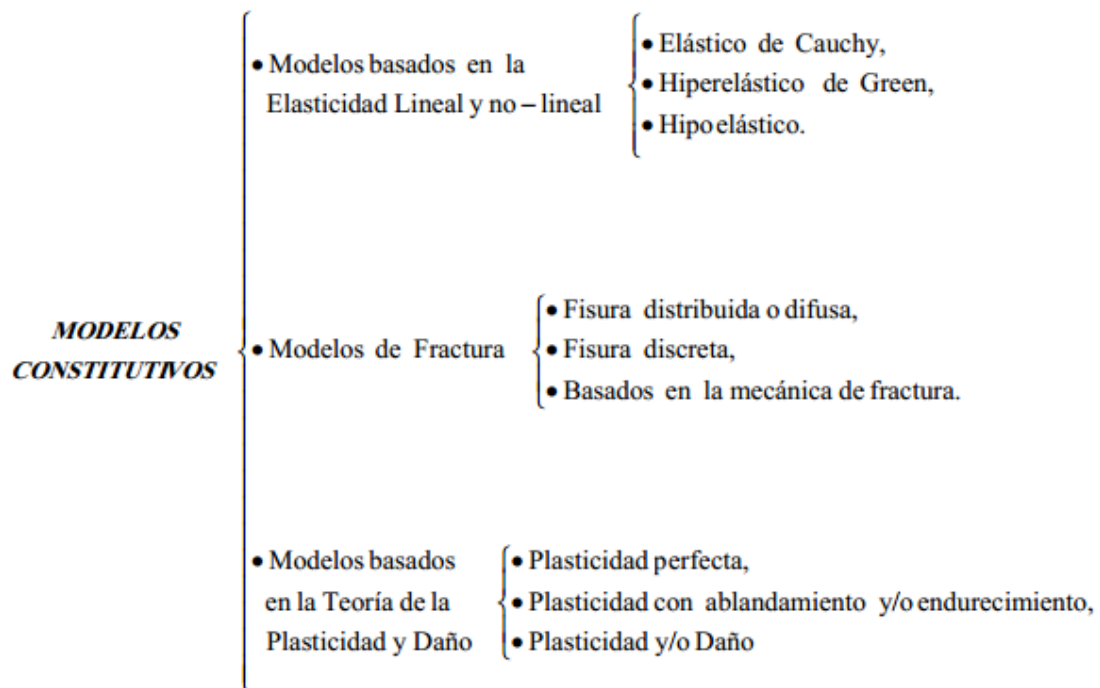


Figura 7. Clasificación de los modelos constitutivos [5]

Con esta clasificación se quiere transmitir que el comportamiento macroscópico de un sólido puede representarse por distintas vías sin que en ningún caso se esté representando la verdadera física microestructural del material.

A continuación se procede a explicar dos modelos inelásticos consolidados que serán fundamentales para la comprensión de los modelos constitutivos referidos a materiales poliméricos.

2.2.1. Modelos inelásticos

En inelasticidad ha de tenerse en cuenta el historial de tensiones, existiendo así una dependencia del tiempo. Una forma en la que el historial de tensiones puede afectar la relación tensión-deformación es a través de la velocidad de aplicación.

Una manifestación particular de este fenómeno es el hecho de que la deformación puede en general aumentar a través del tiempo dada una tensión constante. Este fenómeno se denomina *fluencia lenta*. Esta sensibilidad a la velocidad aumenta con la temperatura, de forma que hay materiales que aparentan comportarse elásticamente dentro de un rango de ciertas temperaturas y se transforman en inelásticos a temperaturas mayores.

De igual forma, una aplicación más lenta de las cargas implica mayores deformaciones para la misma tensión e implica una tensión menor para la misma deformación. De esta manera las tensiones van a disminuir a través del tiempo dada una deformación fija, este fenómeno se llama *relajación*.

La sensibilidad a la velocidad de muchos materiales, entre ellos los polímeros, puede ser bien descrita a través de la teoría lineal, siempre dentro de ciertos límites.

2.2.1.1 Modelo de Maxwell

Este modelo consiste en la semejanza del sistema a un muelle y un amortiguador dispuestos en serie, esto simula que la deformación total resulte de la composición de una parte elástica ϵ_e (simulada por un resorte con módulo elástico E) más una parte viscosa ϵ_{vis} (simulada por un amortiguador de constante η).

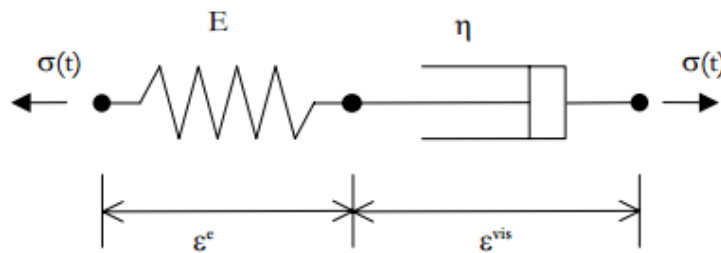


Figura 8. Representación esquemática del Modelo de Maxwell [7]

$$\sigma_T = \sigma_e = E \epsilon_e = \sigma_{vis} = \eta \dot{\epsilon}_{vis} \quad (1)$$

$$\epsilon = \epsilon_e + \epsilon_{vis} \quad (2)$$

Ecuación diferencial:
$$\sigma + \frac{\eta}{E} \dot{\sigma} = \eta \dot{\epsilon} \quad (3)$$

2.2.1.2 Modelo de Kelvin-Voigt

Este modelo consiste en la semejanza del sistema a un muelle y un amortiguador dispuestos en paralelo. La tensión total es la suma de la producida en el resorte y la producida en el amortiguamiento viscoso, sin embargo, el desplazamiento tiene que ser el mismo en ambos dispositivos.

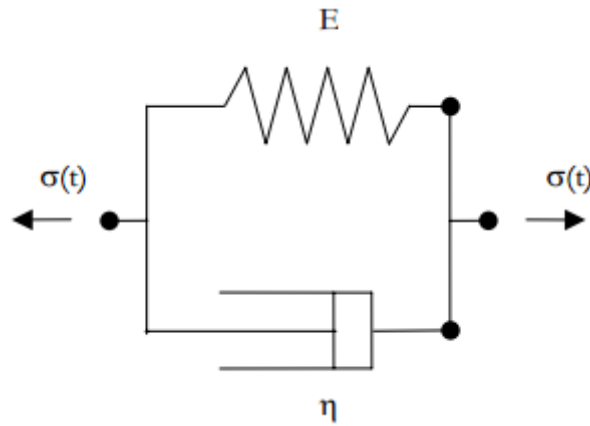


Figura 9. Representación esquemática del Modelo de Kelvin-Voigt [8]

$$\sigma = \sigma_e + \sigma_{vis} = E \epsilon_e + \eta \epsilon_{vis} \quad (4)$$

$$\epsilon_T = \epsilon_e = \epsilon_{vis} \quad (5)$$

Ecuación diferencial: $\sigma = E \epsilon + \eta \dot{\epsilon} \quad (6)$

Aunque ambos modelos son muy sencillos, combinaciones del modelo de Maxwell y del modelo de Kelvin tanto en serie como en paralelo, crean modelos más complejos y representativos.

2.2.2. Modelos constitutivos para materiales poliméricos

En cuanto a los modelos referidos a materiales poliméricos y por lo tanto más enfocados al tema que se trata en este proyecto encontramos:

2.2.2.1 Modelos constitutivos de Drucker-Prager y de Burzynski-Torre

Dentro de los modelos más sencillos cabe destacar el modelo clásico de Drucker-Prager [6], introducido originalmente para representar el comportamiento plástico de los suelos y posteriormente extendido a otro tipo de materiales como el hormigón, espumas y polímeros. Otro modelo que recoge las características de estos polímeros anteriormente indicadas, es el modelo de Burzynski-Torre [9]. Éste es una particularización del criterio de Burzynski publicado en 1929 [10], y que ha sido recientemente implementado en códigos de elementos finitos. Los dos criterios anteriores se pueden escribir según la siguiente expresión general:

$$8 \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_t} \right)^n + 3a \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_t} \right) - b = 0 \quad (7)$$

Donde los valores de los parámetros a , b y n varían en función del modelo al que se quiera aplicar según la Tabla 3.

MODELO	a	b	n
Drucker-Prager	$m-1/m+1$	$2m/m+1$	1
Burzynski-Torre	$m-1$	m	2

Tabla 3. Valores de los parámetros de los modelos Drucker-Prager y Burzynski-Torre

Aquí, m es el cociente entre límite elástico del material a tracción, σ_t , y el límite elástico a compresión, σ_c ; σ_{eq} es la tensión equivalente de Von Mises, y σ_H es la tensión hidrostática.

2.2.2.2 Modelo constitutivo de Ghorbel

Otro modelo, algo más complejo que los anteriores, es el modelo de Ghorbel [7], que considera la influencia de la triaxialidad, incorporando en la ecuación constitutiva el segundo (J_2) y tercer (J_3) invariante del tensor de tensiones desviador. Dicha ecuación constitutiva se puede construir a partir de la expresión (8), con los parámetros correspondientes al modelo Burzynski-Torre, y añadiendo la dependencia con J_2 y J_3 , resultando:

$$\frac{8}{7} \left(1 - \frac{27J_3^2}{32J_2^2} \right) \left(\frac{\sigma_{eq}}{\sigma_t} \right)^2 + 3(m-1) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_t} \right) - m = 0 \quad (8)$$

2.2.2.3 Modelo constitutivo de Arruda-Boyce

El modelo de Arruda-Boyce [8] o modelo constitutivo tridimensional para la deformación de polímeros vítreos es una adaptación elástico-viscoplástica del modelo estándar de viscoelasticidad para un sólido lineal. Los elementos del modelo se pueden visualizar en una dimensión mediante el esquema de la Figura 10; este enfoque se basa en el modelo original de una dimensión de Haward y Thackray [11] y sirve de base para otros estudios como el modelo propuesto por Mülken y Boyce en su estudio sobre la Mecánica de deformación elastoplástica dependiente de la velocidad de deformación en polímeros termoplásticos [12].

Los elementos que componen el modelo de Arruda-Boyce son los siguientes (ver Figura 10):

- Un resorte lineal (1 en la imagen) utilizado para caracterizar la respuesta elástica inicial. Este elemento actúa en serie con un elemento de Kelvin-Voigt.
- Un amortiguador viscoplástico (2 en la imagen) térmicamente activado utilizado para representar la dependencia con la velocidad de deformación y la temperatura.
- Un resorte de Langevin (3 en la imagen). Este elemento es capaz de capturar el estado de dependencia de la respuesta con la cantidad de deformación plástica acumulada. Además, el modelo de Langevin o de las 8 cadenas, contribuye con la descarga no lineal observada durante los ensayos de tracción uniaxial.

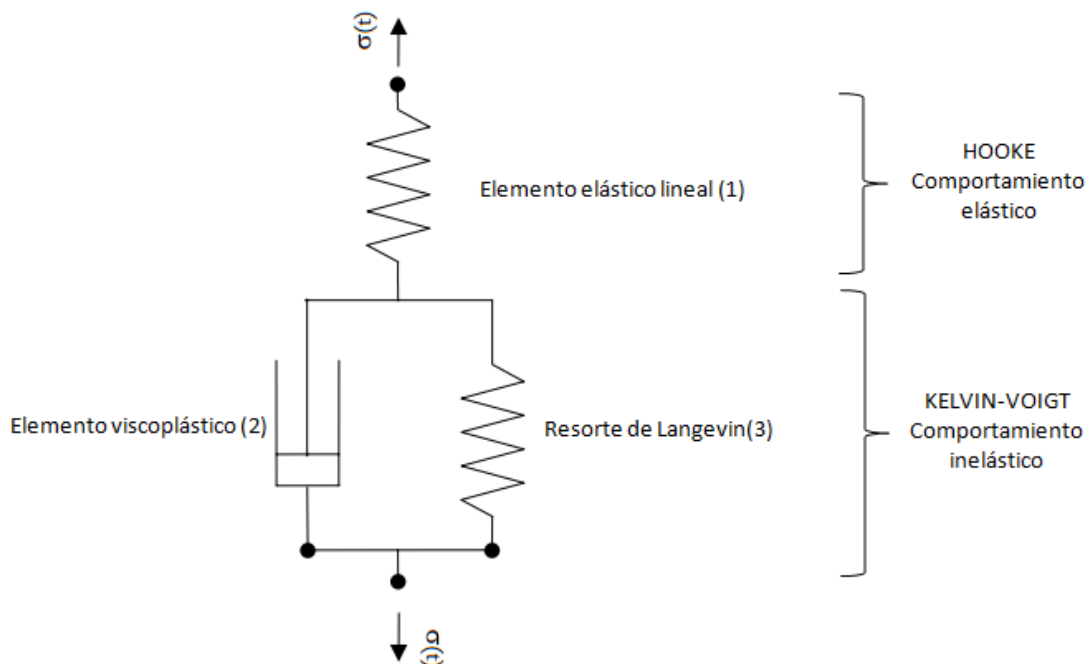


Figura 10. Representación esquemática del Modelo de Arruda-Boyce

2.3. Modelos de daño

2.3.1. Modelos de daño continuo

La Mecánica del Daño Continuo se emplea para describir la progresiva degradación del material previa a la aparición de macro-grietas. Como su nombre indica, se considera el sólido como continuo sin aparición de fisuras.

Los modelos basados en la Mecánica del Daño se estudian desde un punto de vista macroscópico típico de la Mecánica de Medio Continuos. Para ello se define un parámetro de daño (D) relacionado con la densidad efectiva de grietas en cada punto, en el caso isótropo, y cada punto y plano, en el caso anisótropo. El parámetro de daño D varía entre 0 y 1, correspondiendo el valor 0 a un estado no dañado y de valor unidad al estado de ruptura local.

Existen dos planteamientos diferentes en función del tipo de material:

2.3.1.1 Principio de deformación equivalente

“La deformación asociada con un estado dañado bajo unas tensiones aplicadas es equivalente a un estado de deformación sin dañar asociado bajo unas tensiones efectivas” (LeMaître, 1985).

Se introduce el concepto de tensión efectiva como la tensión que daría lugar a las mismas deformaciones que aparecen en el sólido dañado en el modelo sin daño.

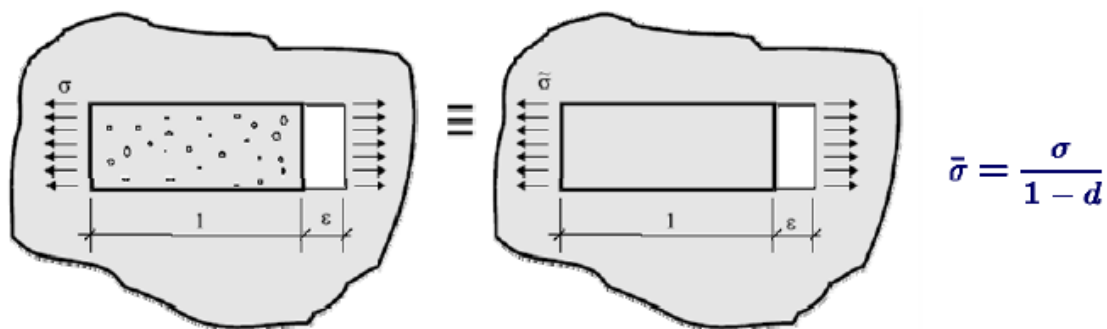


Figura 11. Representación del principio de deformación equivalente

2.3.1.2 Principio de tensión equivalente

“La tensión asociada con un estado dañado bajo unas deformaciones dadas es equivalente a un estado de tensional sin dañar, asociado a unas deformaciones efectivas”.

Basado en el principio de tensión equivalente, se introduce el concepto de deformación efectiva como la deformación que daría lugar a las mismas tensiones que aparecen en el sólido dañado en el modelo sin daño.

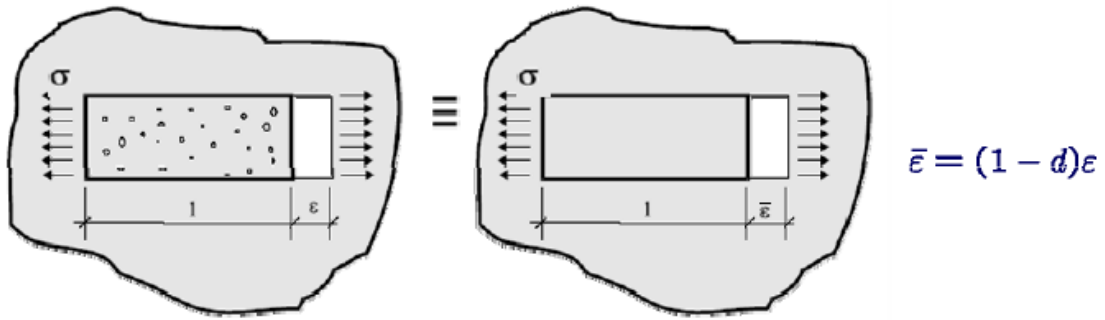


Figura 12. Representación del principio de tensión equivalente

Una vez descritos ambos principios se puede comprender mejor el modelo de LeMaître [13]:

2.3.1.3 Modelo de LeMaître

Este modelo está basado en el concepto de propiedades efectivas, utiliza una aproximación de tipo fenomenológica para el cálculo del parámetro de daño D. Dicho parámetro modifica el módulo de Young y la tensión de fluencia con el objeto de modelizar el ablandamiento progresivo del material.

La ley de evolución incremental del parámetro de daño D puede expresarse de la siguiente forma:

$$\partial D = \begin{cases} 0, & \bar{\varepsilon}_p \leq \varepsilon_D \\ \frac{D_c}{\varepsilon_R - \varepsilon_D} \left[\frac{2}{3(1 + \nu)} + 3(1 - 2\nu) \left(\frac{\sigma_H}{\sigma_{eq}} \right)^2 \right] (\varepsilon_{eq})^{2/r} \partial \bar{\varepsilon}_p, & \bar{\varepsilon}_p > \varepsilon_D \end{cases} \quad (9)$$

Donde ν es el coeficiente de Poisson, σ_H es la tensión hidrostática, σ_{eq} la tensión equivalente, $\bar{\varepsilon}_p$ la deformación plástica equivalente, ε_D el valor de la deformación a partir del cual aparece el daño, ε_R y D_c representan el valor de la deformación y el daño de ruptura y r es un parámetro del modelo que puede ser ajustado utilizando un ensayo de tracción.

3. RESULTADOS EXPERIMENTALES DE VALIDACIÓN

El análisis del impacto asimétrico en placas de policarbonato que se analiza en este proyecto está basado en los estudios previos realizados por los investigadores Ravi Chandar et al. en sus artículos “On the failure mode transitions in polycarbonate under dynamic mixed mode loading” [2] y “Failure mode transitions in polymers under high strain rate loading” [14].

Como resultado de dichos trabajos, se encontró una relación entre la velocidad de impacto del proyectil y el modo de fallo que aparece en el material, policarbonato en este caso. Para ello Ravi Chandar realizó un ensayo experimental basándose en ensayos anteriores como los de Kalthoff [15] [16] y el de Lee y Freund [17]. Dicho ensayo consiste en un impacto producido por un proyectil cilíndrico de policarbonato lanzado por un cañón neumático contra una probeta plana también de dicho material según la configuración que se recoge en la Figura 13. La probeta tiene una entalla mecanizada sobre la que se fue variando la altura de impacto del proyectil en referencia al borde de la fisura. A su vez, la velocidad a la que se produce el lanzamiento del proyectil varía entre un rango determinado.

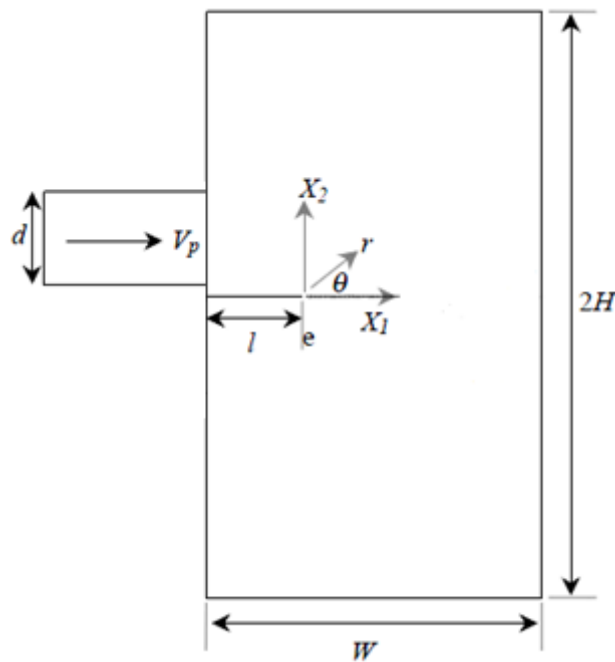


Figura 13. Geometría del impacto para el ensayo de Ravi Chandar

3.1. Procedimiento

3.1.1. Geometría

3.1.1.1 Probeta

Se trata de una probeta fabricada de policarbonato con una anchura (W) de 100 mm, una altura (2H) de 400 mm y un espesor de 6 mm. La probeta tiene mecanizada una entalla a la mitad de su altura que tiene una longitud (l) de 12.7 mm y un espesor (e) de 0.3 mm.

3.1.1.2 Proyectoil

Al igual que la probeta el proyectoil está fabricado de policarbonato y cuenta con una longitud de 100 mm y un diámetro de 50 mm.

El proyectoil es lanzado con un cañón neumático alcanzando velocidades de entre 25 y 70 m/s. Durante el ensayo, dicha velocidad es medida por la interrupción de un laser situado en dirección transversal al lanzamiento del proyectoil.

3.1.2. Obtención de datos

En este ensayo, la información referente al cálculo de tensiones se obtiene aplicando métodos fotoelásticos. La secuencia del impacto queda registrada hasta que el proyectoil queda fuera del campo de visión aproximadamente tras 200 μ s. Dicho registro de secuencia se consigue a través de una cámara de alta velocidad capaz de obtener 100000 fotogramas por segundo.

3.2. Resultados

Como se puede observar en el resumen de la Figura 14, los resultados que obtiene el autor son los siguientes:

- Para velocidades de impacto menores que 32 m/s aparecen deformaciones plásticas próximas al final de la fisura sin llegar a producirse propagación de la grieta.
- Para velocidades de entre 32 y 55 m/s aparece en primer lugar una fractura frágil del material (identificada en la Figura 14 con la letra B) para posteriormente

aparecer una segunda fractura (L), también frágil, con una orientación de 70° respecto a la horizontal aproximadamente. Esta segunda fractura es debida a la interacción de las ondas reflejadas en las paredes de la probeta con la zona del extremo de la entalla.

- Para velocidades superiores a 55 m/s aparece una propagación de la grieta por Bandas Adiabáticas de Cortadura (ASB) que corresponde con el fallo dúctil del policarbonato, esta propagación se produce de manera prácticamente horizontal y se detiene después de avanzar unos pocos milímetros. Justo a la velocidad de 55 m/s es donde Ravi Chandar encuentra la transición frágil-dúctil.

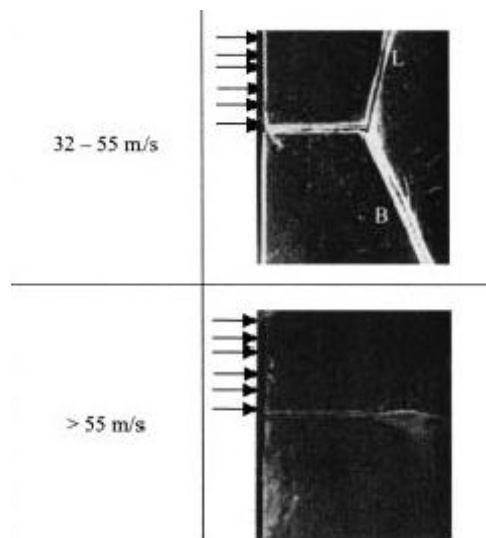


Figura 14. Propagación de grieta en los ensayos de Ravi Chandar

4. DESCRIPCIÓN DEL MODELO

4.1. Modelo constitutivo

Tal y como se dijo anteriormente, se denomina modelo constitutivo a aquella formulación matemática capaz de describir el comportamiento físico macroscópico de un sólido ideal. Partiendo de esta definición, dentro de este apartado cabe destacar la descripción del comportamiento del policarbonato así como la dependencia del mismo con ciertos parámetros como temperatura y velocidad de deformación.

4.1.1. Relación constitutiva utilizada para el policarbonato

Los resultados del experimento desarrollado por Buisson y Ravi Chandar [18] sugieren una variación repetitiva en la relación entre deformación y tensión verdadera sin llevar con ello implícito una suavización en el comportamiento del material. Con base en dichos resultados, el comportamiento constitutivo del policarbonato se simplifica aplicando una ley trilineal que define las curvas que aparecen en la Figura 15. En este proyecto se añade una cuarta ecuación con el objetivo de suavizar la curva y evitar problemas de carácter numérico. Esta ley aparece recogida en la ecuación (10).

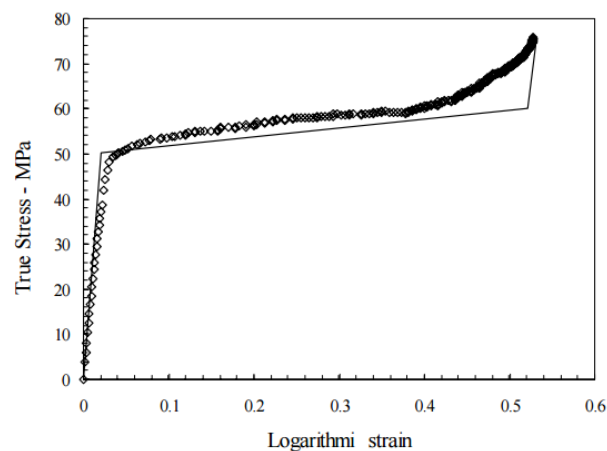


Figura 15. Tensión verdadera frente a deformación verdadera o logarítmica

Ley trilineal modificada:

$$\sigma = \begin{cases} \sigma_1 & \text{si } \varepsilon \leq \frac{\sigma_y}{E} \\ \sigma_2 & \text{si } \frac{\sigma_y}{E} \leq \varepsilon \leq 0.81\varepsilon_h + \frac{\sigma_y}{E} - \varepsilon_0 \\ \sigma_3 & \text{si } 0.81\varepsilon_h + \frac{\sigma_y}{E} - \varepsilon_0 \leq \varepsilon \leq \varepsilon_h + \frac{\sigma_y}{E} - \varepsilon_0 \\ \sigma_4 & \text{si } \varepsilon \geq \varepsilon_h + \frac{\sigma_y}{E} - \varepsilon_0 \end{cases} \quad (10)$$

Siendo:

$$\sigma_1 = E \varepsilon$$

$$\sigma_2 = \sigma_y + A \left(\varepsilon - \frac{\sigma_y}{E} \right)$$

$$\sigma_3 = \sigma_y + A(0.81\varepsilon_h - \varepsilon_0) + B \left(\varepsilon - 0.81\varepsilon_h - \frac{\sigma_y}{E} + \varepsilon_0 \right)$$

$$\sigma_4 = \sigma_y + A(0.81\varepsilon_h - \varepsilon_0) + 0.19B\varepsilon_h + E \left(\varepsilon - \varepsilon_h - \frac{\sigma_y}{E} + \varepsilon_0 \right)$$

Donde:

- Módulo de Young: $E=2.4$ (GPa)
- Deformación en el límite elástico: $\varepsilon_0=0.021$
- Def. al comienzo de la orientación molecular: $\varepsilon_h=0.521$
- Constante ley constitutiva: $A=5$ (MPa)
- Constante ley constitutiva: $B=100$ (MPa)

4.1.1.1 Dependencia entre límite elástico y temperatura

Las propiedades del policarbonato, al ser un material termoplástico, varían con la temperatura. Por simplicidad se asume dependencia lineal entre límite elástico y temperatura para un rango de 20-50°C. Dicha relación viene definida por la siguiente ecuación descrita en el estudio realizado por Ravi Chandar [14]:

$$\sigma_y(T) = \sigma_0 - \beta(T - T_0) \quad (11)$$

Para la ecuación anterior se han tenido en cuenta las siguientes propiedades del policarbonato:

- Límite elástico inicial: $\sigma_0=50.4$ (MPa)
- Coeficiente de expansión térmica: $\beta=0.25$ (MPa/K)
- Temperatura de referencia: $T_0=293$ (K).

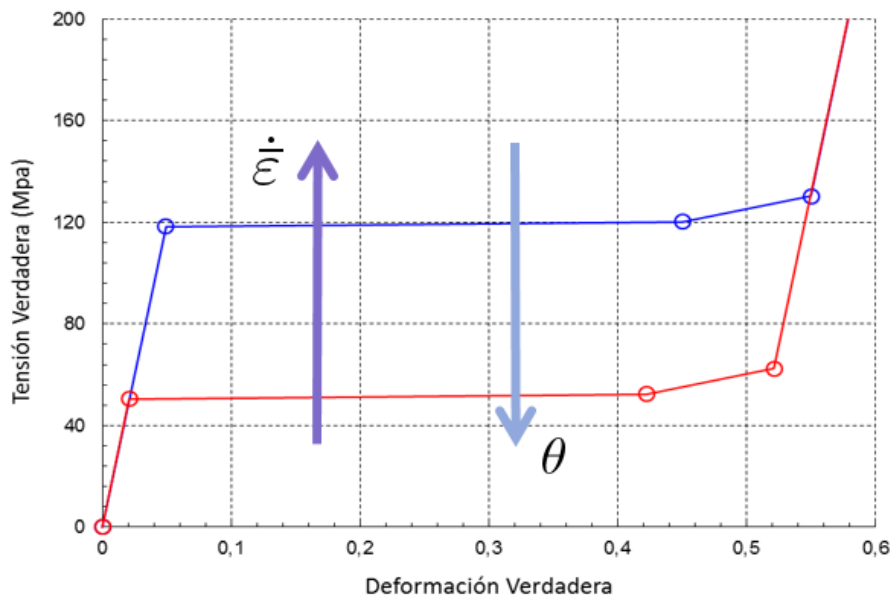
4.1.1.2 Dependencia entre límite elástico y velocidad de deformación

Para describir la dependencia entre límite elástico y velocidad de deformación se incorpora la ecuación descrita por Fu et al. [19]. Dicha ecuación se basa en una modificación sobre la Teoría de Eyring que trata el comportamiento de los polímeros.

$$\sigma_y(\dot{\epsilon}) = \sigma_0 + \frac{2KT}{V} \sinh^{-1} \left(\frac{\dot{\epsilon}}{\dot{\epsilon}^*} \right)^{1/n} \quad (12)$$

Para la ecuación anterior se han tenido en cuenta las siguientes propiedades del policarbonato:

- Límite elástico inicial: $\sigma_0=50.4$ (MPa)
- $2KT/V=187$ (MPa) donde:
 - K es la constante de Boltzmann.
 - T es la temperatura absoluta.
 - V es el volumen de activación.
- Velocidad de deformación característica: $\dot{\epsilon}^*=1.7 \cdot 10^6$ (s⁻¹)
- $n=1.7 \cdot 10^6$ (s⁻¹)



Gráfica 1. Relación constitutiva utilizada para el policarbonato

4.2. Modelo de daño

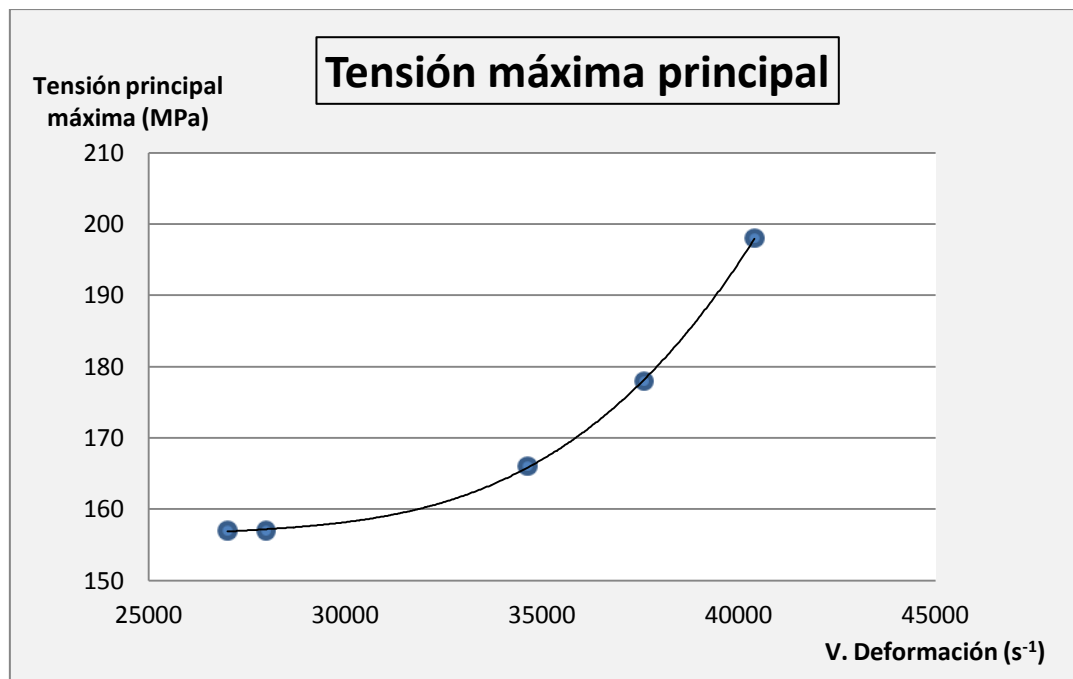
En este proyecto se implementa un modelo de daño basado en el implementado por Dolinski et al. [20]. Dicho modelo engloba dos criterios aplicados a los modos de fallo: un criterio para fallo frágil y un criterio para fallo dúctil.

4.2.1. Modelo de daño frágil

El modelo de daño frágil se basa en un criterio de fallo local definido por la tensión máxima principal del material. El fallo ocurre cuando dicha tensión alcanza el valor crítico en algún punto del material (σ_I^{crit}).

$$\sigma_I^{crit} = \begin{cases} 156 \text{ (MPa)} & \text{si } \dot{\epsilon} \leq 2700 \text{ (s}^{-1}\text{)} \\ 1.622 \cdot 10^{-11} \dot{\epsilon}^3 - 1.3274 \cdot 10^{-6} \dot{\epsilon}^2 + \\ + 3.6544 \cdot 10^{-2} \dot{\epsilon} - 181.38 & \text{si } \dot{\epsilon} > 2700 \text{ (s}^{-1}\text{)} \end{cases} \quad (13)$$

Como podemos observar en la ecuación anterior y en la Gráfica 2, el valor de la tensión máxima principal crítica depende de la velocidad de deformación. Dicha ecuación ha sido obtenida mediante un ajuste polinómico realizado a partir de los resultados experimentales del estudio de Ravi Chandar [14].



Gráfica 2. Tensión principal máxima en función de la velocidad de deformación

4.2.2. Modelo de daño dúctil

El criterio de fallo para el modelo de daño dúctil se basa en la densidad de energía de deformación. Dicho criterio establece como se degrada la tensión de un elemento siguiendo la siguiente ecuación:

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \tilde{\sigma}_{eq}^*(1 - D) \quad (14)$$

Donde:

- $\tilde{\sigma}_{eq}^*$ es la tensión equivalente en un momento concreto y una deformación equivalente dada, $\tilde{\epsilon}_{eq}$, mayor que la deformación equivalente a la que el material comienza a degradarse, $\tilde{\epsilon}_{eq}^{crit}$.
- D es una variable de daño que representa el nivel de degradación del material. Dicha variable adopta valores entre 0 y 1, tomando el valor 0 cuando el material está intacto y el valor 1 cuando el material ha perdido toda su capacidad resistente.

$$D = \frac{w - w_{crit}}{w_{fract} - w_{crit}} \quad (15)$$

Siendo w_{fract} la densidad de energía que aparece cuando se produce la ruptura total del elemento (cuando la tensión equivalente alcanza el valor 0) y w_{crit} aquella que determina el nivel crítico de densidad de energía total almacenada en el elemento.

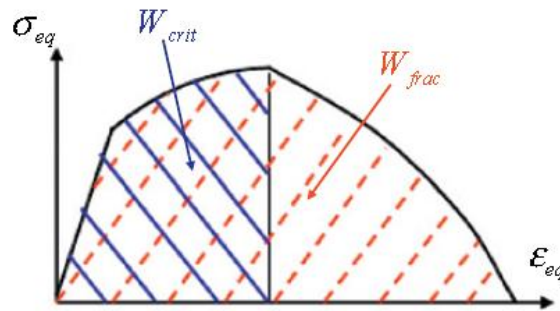


Figura 16. Relación tensión-deformación con las densidades de energía de deformación y fractura [20]

4.3. Modelo numérico

El modelado numérico es una técnica basada en el cálculo numérico utilizada en muchos campos de estudio para validar o refutar modelos conceptuales propuestos a partir de observaciones o derivados de teorías anteriores. Uno de los objetivos principales de este proyecto es la obtención de un modelo consistente. Si el cálculo de las ecuaciones que representan el modelo propuesto es capaz de ajustarse y validar las observaciones experimentales, entonces se habla de un modelo consistente con las mismas.

Antes de entrar en la descripción del modelo numérico cabe realizar una pequeña introducción tanto al método de elementos finitos como al software comercial Abaqus.

4.3.1. Introducción al método de elementos finitos (MEF)

El método de los elementos finitos (MEF) es una de las herramientas más potentes usadas en la actualidad para la resolución numérica de problemas ingenieriles tales como análisis estructural, comportamiento mecánico de automóviles, problemas de transferencia de calor, etc.

Mediante el método de elementos finitos se realiza una aproximación matemática para obtener la solución de problemas continuos. Dicha aproximación está basada en transformar un cuerpo de naturaleza continua en un modelo discreto equivalente. A esta transformación se le denomina discretización del modelo.

El modelo continuo se divide en un número finito de partes denominados elementos. Las propiedades del material y sus ecuaciones constitutivas son aplicadas sobre dichos elementos, los cuales poseen unos puntos característicos denominados nodos. Estos nodos son los puntos de unión de cada elemento con sus adyacentes.

El comportamiento en el interior de cada elemento queda definido a partir del comportamiento de los nodos mediante las *funciones de interpolación* o *funciones de forma*. Estas funciones definen de manera única el campo de desplazamientos dentro de cada elemento finito, expresado en términos de desplazamientos nodales. Es por tanto, una aproximación de los valores de una función a partir del conocimiento de un número determinado y finito de puntos.

Las funciones de forma se pueden ajustar a leyes polinómicas, donde dependiendo del grado de interpolación, pueden dar lugar a mayores o menores costes computacionales. Normalmente se utilizan funciones de forma lineales.

La relación entre estos elementos, considerando debidamente las condiciones de contorno, cargas y restricciones, da lugar a un sistema de ecuaciones cuya solución va a permitir obtener resultados mediante los cuales conocer el comportamiento aproximado del modelo continuo. [21]

El método de elementos finitos puede dividirse en tres etapas:

- Preproceso: preparación del modelo para el cálculo. En esta etapa se realizan las operaciones de:
 - Dibujo de la geometría del modelo.
 - Selección de las propiedades de los materiales.
 - Aplicación de cargas exteriores y condiciones de contorno.
 - Discretización del modelo en elementos finitos.
- Resolución: etapa en la que se realizan todos los cálculos y se generan las soluciones. En ella se realizan las operaciones de:
 - Selección del tipo de cálculo a realizar.
 - Configuración de los parámetros de cálculo, intervalos de tiempo y número de iteraciones.
 - Transferencia de las cargas al modelo, generación de funciones de forma, ensamblaje de la matriz de rigidez, resolución de sistemas de ecuaciones y obtención de la solución.
- Postproceso. En esta etapa se realiza la representación gráfica de los resultados, así como la obtención de resultados indirectos operando las soluciones del modelo.

4.3.2. Introducción a Abaqus

Abaqus es un código comercial de análisis por el método de los elementos finitos de propósito general, orientado a la resolución de problemas no lineales. Fue desarrollado en 1978 por la empresa Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. (HKS), y en la actualidad se utiliza para resolver grandes y complejos problemas ingenieriles.

Dicho software puede ser utilizado para resolver problemas de resistencia de materiales, mecánica de fractura, procesos de conformado de metales, transferencia de calor, etc.

Abaqus está estructurado en tres grandes bloques, en correspondencia con las tres etapas en que se divide un problema para ser analizado por el método de elementos finitos: preproceso, resolución y postproceso.

Por otro lado, Abaqus se encuentra dividido en cuatro módulos:

- ABAQUS/Standard: para resolución de problemas de propósito general. Incluye todas las posibilidades de análisis excepto el análisis dinámico.
- ABAQUS/Explicit: para resolución de problemas de tipo dinámico. Es poderoso por su eficiencia computacional en grandes modelos.
- ABAQUS/CAE: módulo interactivo para la creación de modelos de elementos finitos. A través de este módulo se puede implementar un modelo de forma sencilla y rápida.
- ABAQUS/Viewer: módulo de visualización de soluciones. Muestra los resultados obtenidos una vez resuelto el problema.

Para resolver un problema mediante Abaqus se deben introducir los datos de entrada que necesita el programa. Esta etapa se corresponde con la etapa de preproceso. Los datos de entrada se introducen en el programa a través de un archivo de texto (input file) que contiene toda la información necesaria para realizar la simulación. Este archivo de texto, también denominado *archivo de entrada*, se puede crear de forma interactiva utilizando ABAQUS/CAE, que genera internamente el archivo de texto, o mediante un editor de texto, donde el archivo es escrito directamente por el usuario. Los datos que se introducen en el archivo de entrada son de dos tipos, model data y history data. Los model data que se utilizan para definir el modelo de elementos finitos son:

- Características geométricas: la geometría es lo primero que se introduce y debe representar lo más fielmente posible el cuerpo real que se va a estudiar. Abaqus permite realizar modelos de geometría muy compleja, gracias al módulo ABAQUS/CAE. La geometría, así como el mallado de un modelo, se define mediante los elementos y sus nodos.

- Características del material: el modelo que se va a implementar puede estar formado por varios materiales. Se deben definir las propiedades de los distintos materiales de los que está formado el modelo, y se deben asociar a las partes de la geometría a las que correspondan.
- Interacciones y ensamblaje: la geometría del modelo se puede definir organizándola en partes, por lo tanto, hay que introducir en el archivo de entrada la relación que existe entre esas partes, posibles contactos, además de la posición relativa de unas respecto de las otras. Esto se lleva a cabo a través de un procedimiento conocido como ensamblaje.
- Condiciones iniciales: se deben especificar las condiciones iniciales del modelo. En ocasiones, es necesario especificar condiciones iniciales distintas de cero para tensiones, temperaturas, velocidades, etc.
- Condiciones de contorno: el modelo puede estar sometido a ciertas imposiciones por parte de su entorno que deben ser especificadas en el archivo de entrada. Se pueden imponer restricciones del movimiento, valores de desplazamientos y rotaciones o condiciones de simetría.
- Mallado: es un proceso mediante el cual el modelo de estudio se divide en diferentes elementos en los que se resuelven las ecuaciones de campo.

Después de introducir el archivo de entrada en el programa, se procede a la resolución del modelo. Esta fase es interna y en ella Abaqus no interacciona con el usuario. Una vez que Abaqus ha resuelto el modelo, los resultados de la simulación se ven a través del módulo de visualización, el cual, lee el archivo de datos de salida (output file), y es capaz de crear animaciones de la simulación, gráficos, tablas de resultados, etc. La visualización de los resultados se corresponde con la etapa de postproceso del método de elementos finitos. [22]

4.3.3. Desarrollo del modelo numérico del proyecto

Como se ha comentado anteriormente, el software de elementos finitos elegido tanto para la realización como para la solución del modelo es Abaqus. Dentro del desarrollo del modelo numérico cabe destacar una serie de puntos clave que se desarrollaran a continuación:

4.3.3.1 Geometría del modelo

Dentro del análisis numérico del impacto asimétrico que se analiza en este proyecto caben destacar dos elementos principales: la probeta (elemento que sufre el impacto) y el proyectil (elemento que impacta contra la probeta). La definición de la geometría de estos elementos se lleva a cabo utilizando el módulo *part* que nos ofrece Abaqus.

Para rebajar el coste computacional del análisis se ha modelizado la mitad geométrica a lo largo del plano XY, tanto del proyectil como de la probeta (ver Figura 17). A dichas mitades posteriormente se aplicarán condiciones de simetría.

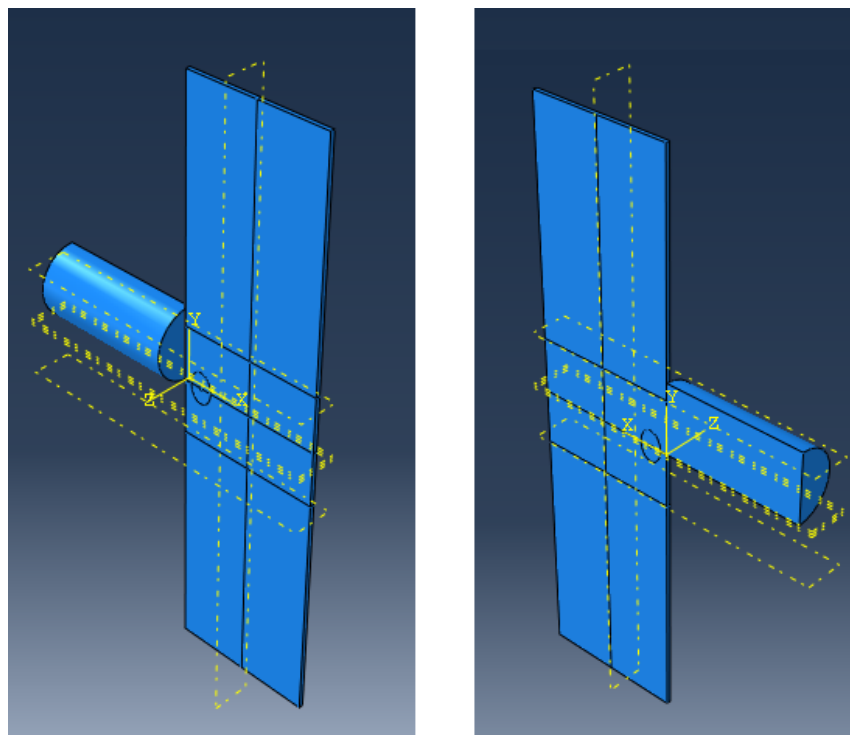


Figura 17. Modelización proyectil y probeta

PROYECTIL

Se trata de un proyectil cilíndrico con un radio $R_{\text{Proyectil}}=25$ (mm) y una longitud $L_{\text{Proyectil}}=100$ (mm).

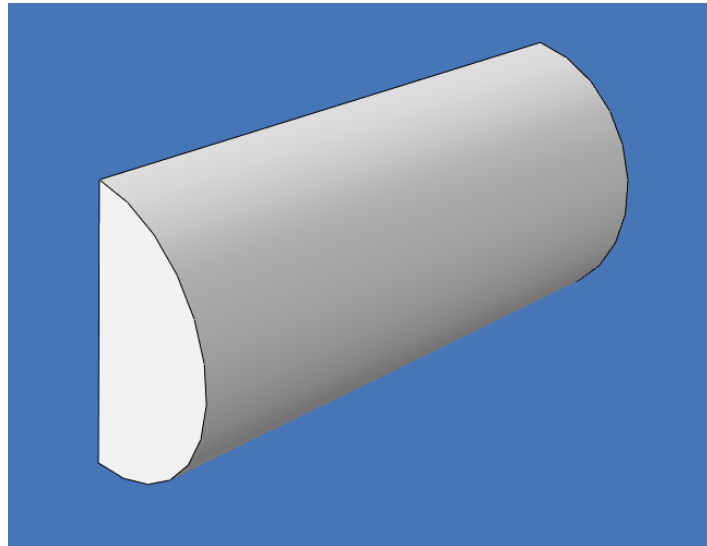


Figura 18. Vista isométrica del proyectil

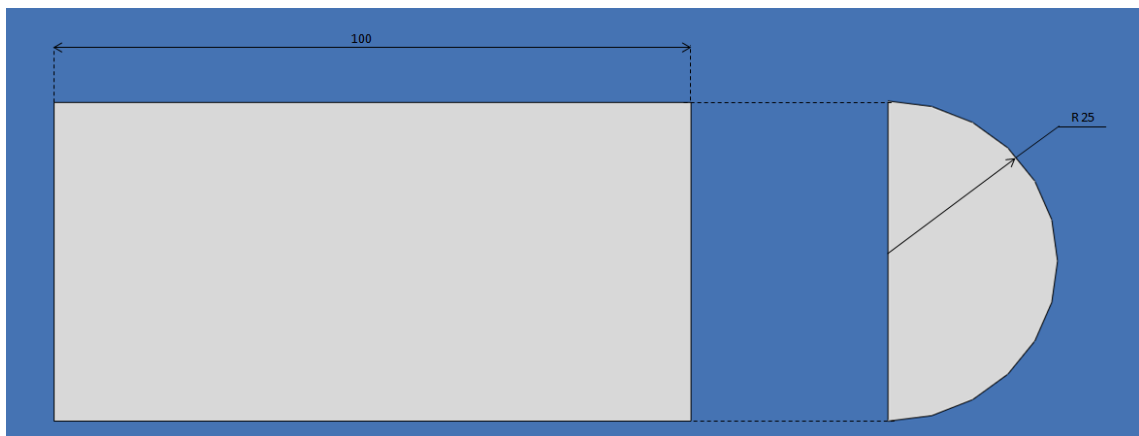


Figura 19. Cotas del proyectil

PROBETA

Se trata de un probeta rectangular plana de longitud $L_{\text{Probeta}}=100$ (mm) y altura $H_{\text{Probeta}}=400$ (mm). El espesor de dicha probeta es uno de los parámetros que se modifican a lo largo del proyecto para simular varios casos y crear comparativas de comportamiento del material. La probeta consta de una entalla simple localizada a la mitad de la altura de la misma con una longitud $L_{\text{Entalla}}=12.7$ (mm), una altura $H_{\text{Entalla}}=0.3$ (mm) y un redondeo en su extremo de radio $R=0.15$ (mm).

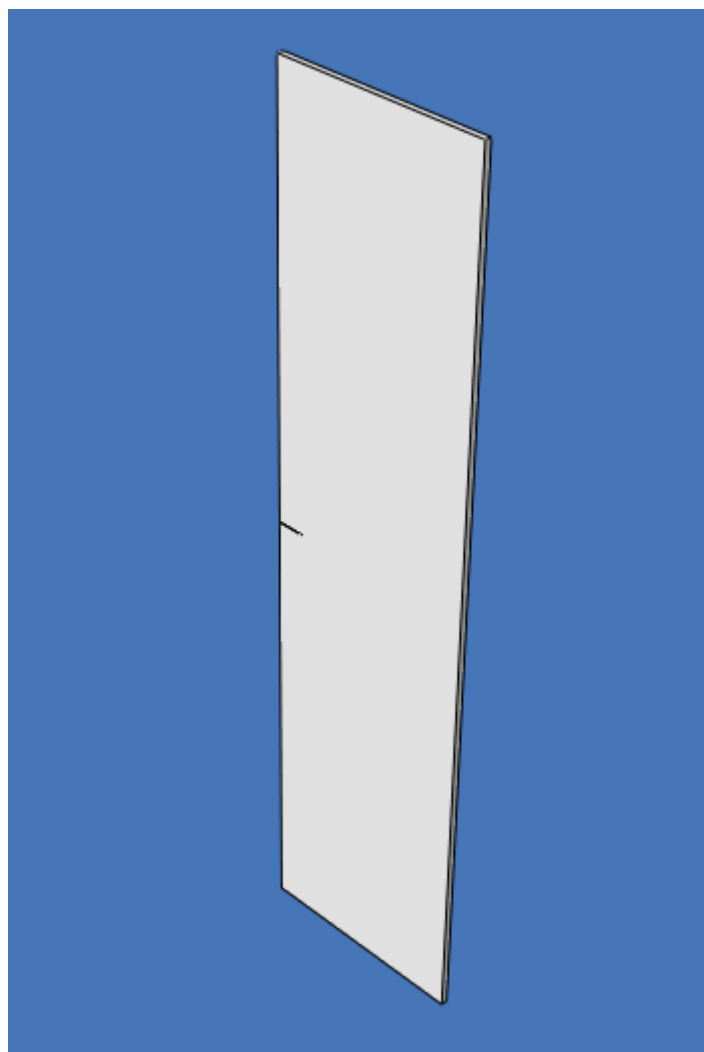


Figura 20. Vista isométrica de la probeta

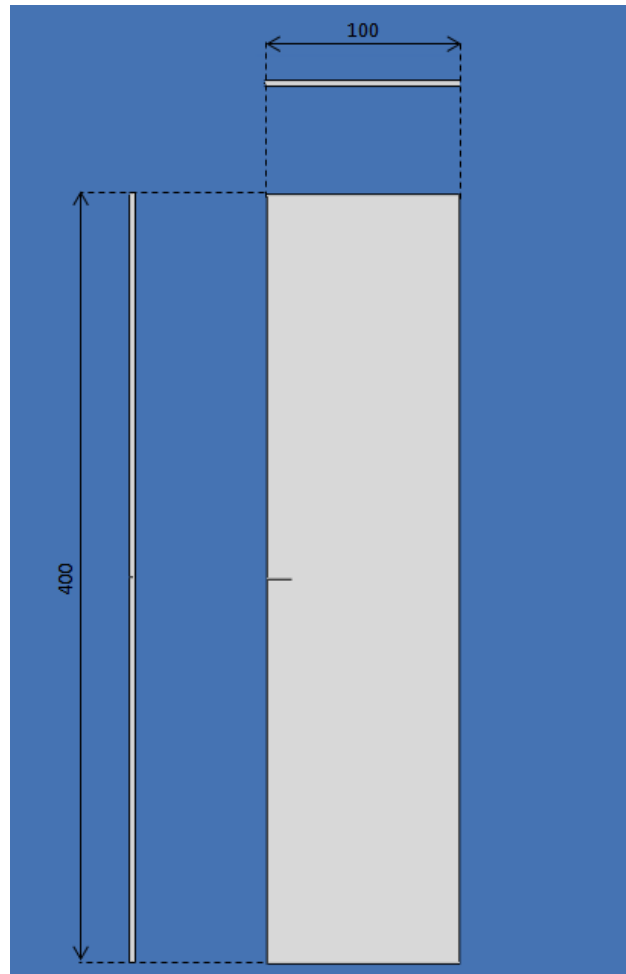


Figura 21. Cotas de la probeta

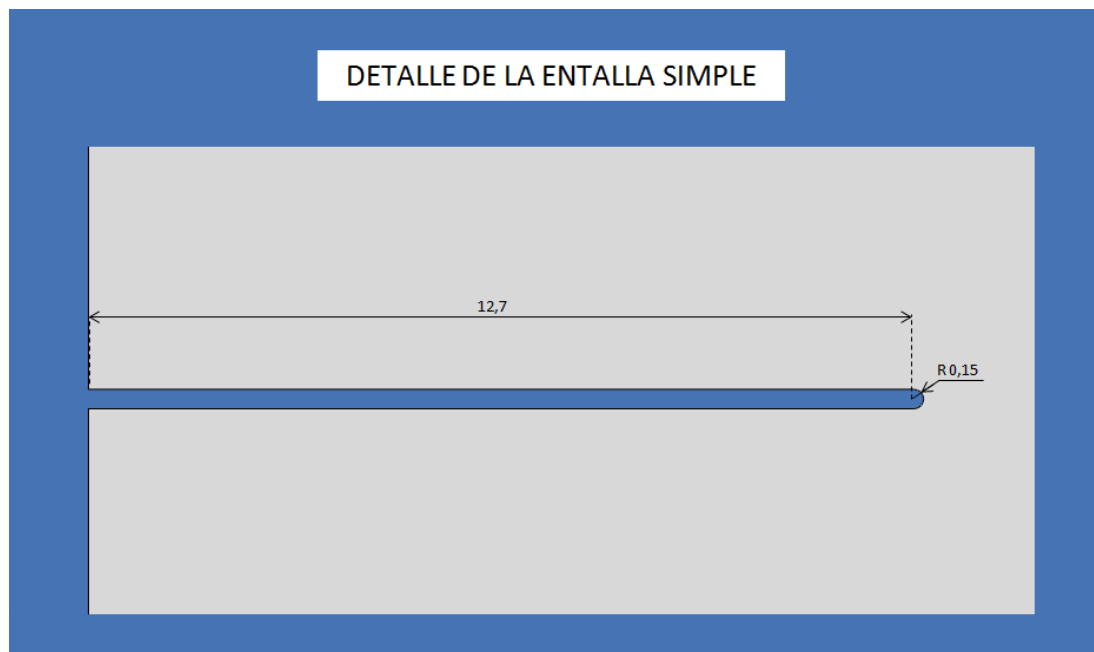


Figura 22. Detalle de la entalla simple

4.3.3.2 Definición del material

Utilizando las opciones que nos ofrece el módulo *property* de Abaqus, se implementa el modelo constitutivo y el modelo de daño para el policarbonato descrito en el apartado 4.1 y 4.2 respectivamente.

Por un lado, se definen las propiedades mecánicas del material:

POLICARBONATO	
Módulo de Young [E]	2400 (Mpa)
Coefficiente de Poisson [ν]	0.34
Densidad [ρ]	1.16 (g/cm ³)
Conductividad	0.2
Calor específico	1170000000
Coefficiente de expansión térmica	6.50E-05
Coefficiente de Quinney-Taylor	0.6

Tabla 4: Propiedades mecánicas del policarbonato

Por otro lado, cabe diferenciar entre la definición del comportamiento elástico y la definición del comportamiento termoviscoplastico del policarbonato:

PROPIEDADES ELÁSTICAS

Para definir el comportamiento elástico del material se utiliza tanto el Módulo Elástico (E) como el Coeficiente de Poisson (ν).

Como se vio en el apartado 4.2.2 (Modelo de daño) el criterio para el modelo de daño dúctil establece como se degrada la tensión de un elemento siguiendo la siguiente ecuación (14):

$$\tilde{\sigma}_{eq} = \tilde{\sigma}_{eq}^* (1 - D)$$

En el modelo numérico, dicha degradación se simula degradando el módulo elástico del policarbonato siguiendo la siguiente ecuación:

$$E_{degradado} = E (1 - D) \quad (16)$$

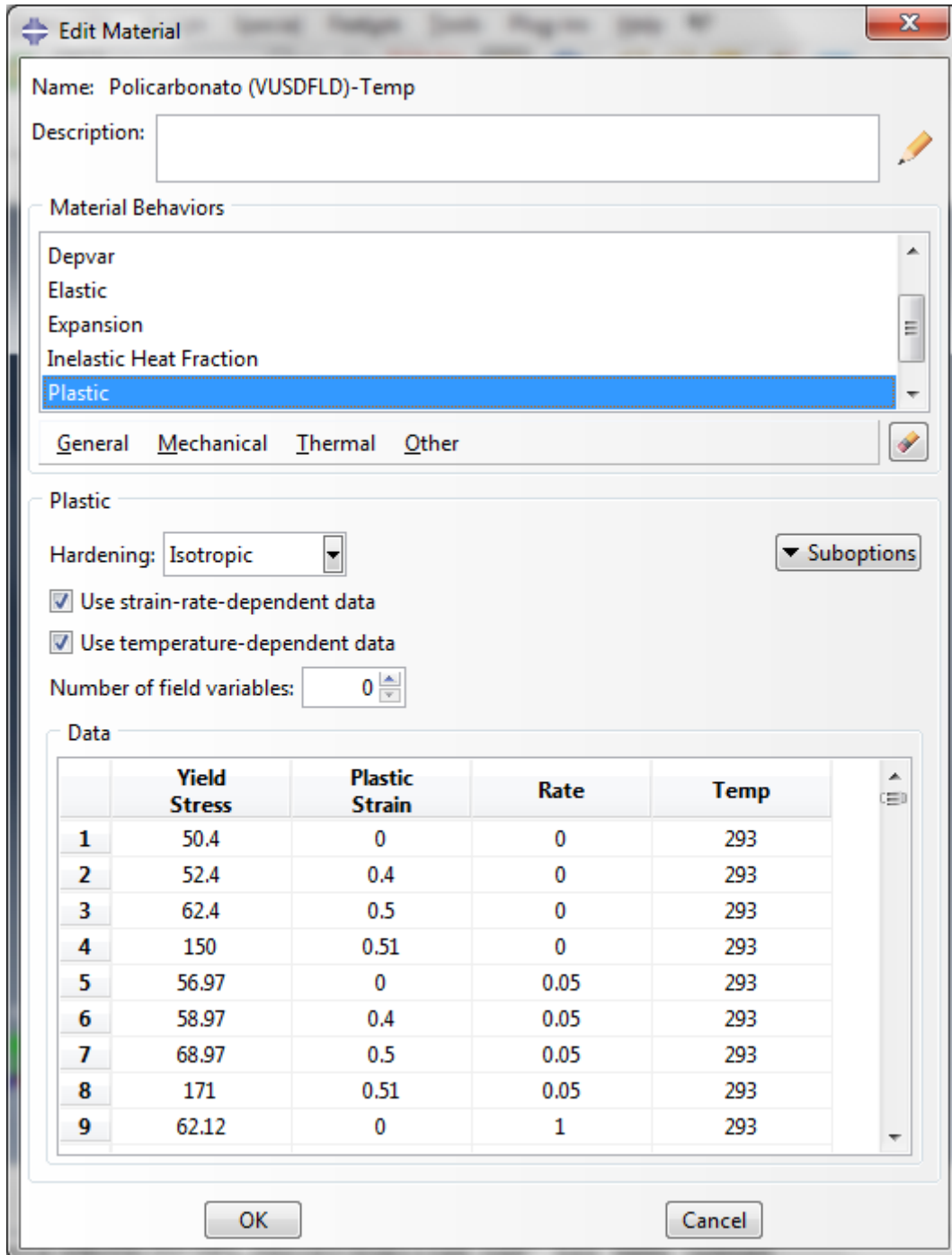
Dicha degradación se apoya en la variable de campo (D) que utiliza la subrutina VUSDFLD desarrollada en el estudio de J. Aranda y J.A. Loya [23] y que se utiliza como herramienta auxiliar en este proyecto.

Módulo de Young (Mpa)	Coefficiente de Poisson	Variable de campo
2400	0.34	0
1800	0.34	0.25
1200	0.34	0.5
600	0.34	0.75
1	0.34	1

Tabla 5: Definición elástica del policarbonato en el modelo numérico

PROPIEDADES TERMOVISCOPLÁSTICAS

La definición del comportamiento termoviscoplastico del policarbonato queda determinada mediante la relación constitutiva descrita en el apartado 4.1.1. Para implementar dicha relación al modelo numérico se introduce de forma tabular en Abaqus como podemos ver en la Figura 23, donde se recoge tanto la dependencia con la velocidad de deformación, como con la temperatura.



Edit Material

Name: Policarbonato (VUSDFLD)-Temp

Description:

Material Behaviors

- Depvar
- Elastic
- Expansion
- Inelastic Heat Fraction
- Plastic**

General Mechanical Thermal Other

Plastic

Hardening: Isotropic

☒ Use strain-rate-dependent data

☒ Use temperature-dependent data

Number of field variables: 0

Data

	Yield Stress	Plastic Strain	Rate	Temp
1	50.4	0	0	293
2	52.4	0.4	0	293
3	62.4	0.5	0	293
4	150	0.51	0	293
5	56.97	0	0.05	293
6	58.97	0.4	0.05	293
7	68.97	0.5	0.05	293
8	171	0.51	0.05	293
9	62.12	0	1	293

OK Cancel

Figura 23. Definición del comportamiento plástico del policarbonato en Abaqus

4.3.3.3 Condiciones iniciales

Utilizando las opciones que nos ofrece la opción *predefined field* del módulo *load* de Abaqus, se implementan una serie de condiciones iniciales sobre el modelo.

Por un lado, se define una temperatura inicial de 293 (K) la cual es considerada como temperatura ambiente. Por otro lado, se define la velocidad inicial del proyectil. Dicha velocidad tomará distintos valores creando varios casos. De la simulación de éstos, se podrá crear una comparativa con la cual poder cuantificar la influencia de la velocidad de impacto sobre la rotura de la probeta.

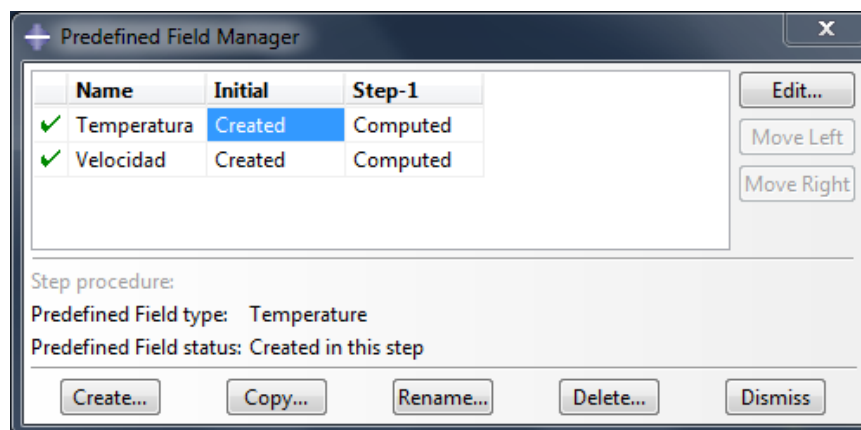


Figura 24. Condiciones iniciales del modelo numérico: temperatura y velocidad

4.3.3.4 Condiciones de contorno

En cuanto a las condiciones de contorno del modelo cabe destacar por un lado las coacciones externas propias del modelo y las condiciones de simetría aplicadas.

Como se vio en el apartado 4.3.2.1 (geometría del modelo), para rebajar el coste computacional del análisis se ha modelizado la mitad geométrica tanto del proyectil como de la probeta. Debido a esta modelización es necesario aplicar condiciones de simetría en el plano medio del modelo, tal y como se puede observar en la zona resaltada en color rojo de la Figura 26. Los movimientos que restringe dicha condición de simetría son los siguientes:

- Desplazamiento a lo largo del eje Z.
- Rotación alrededor del eje X.
- Rotación alrededor del eje Y.

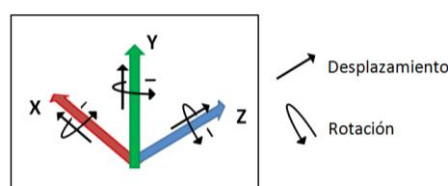


Figura 25. Movimiento en función de los ejes del modelo

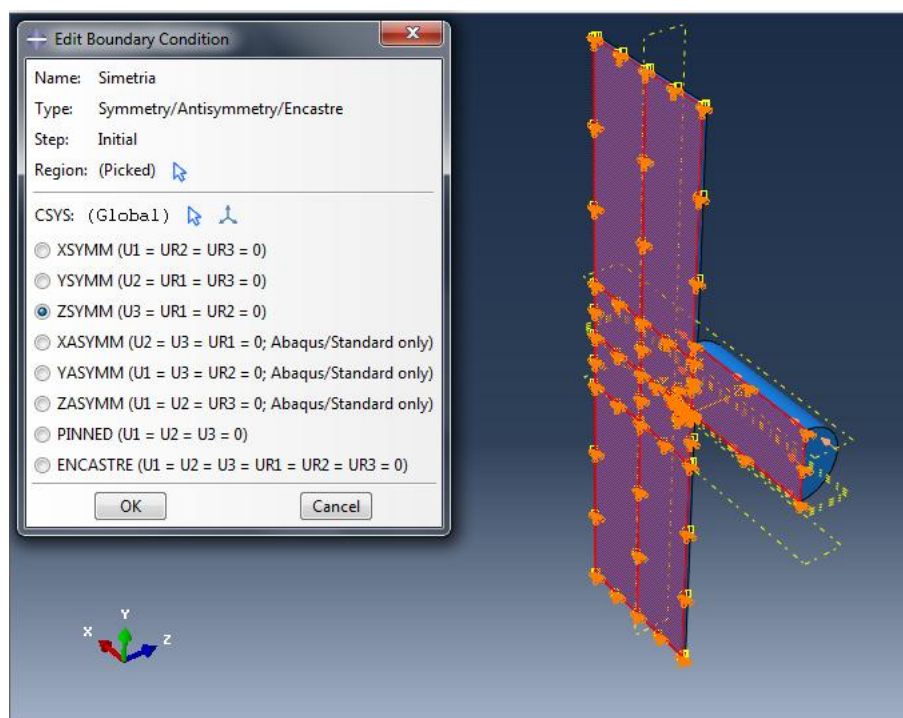


Figura 26. Condiciones de simetría del modelo

Por otro lado, se ha restringido el movimiento a lo largo del eje Y de la probeta (desplazamiento vertical y rotación alrededor del eje). Como se puede observar en la zona resaltada en color rojo de la Figura 27, esta coacción del movimiento se ha aplicado a toda la base de la probeta.

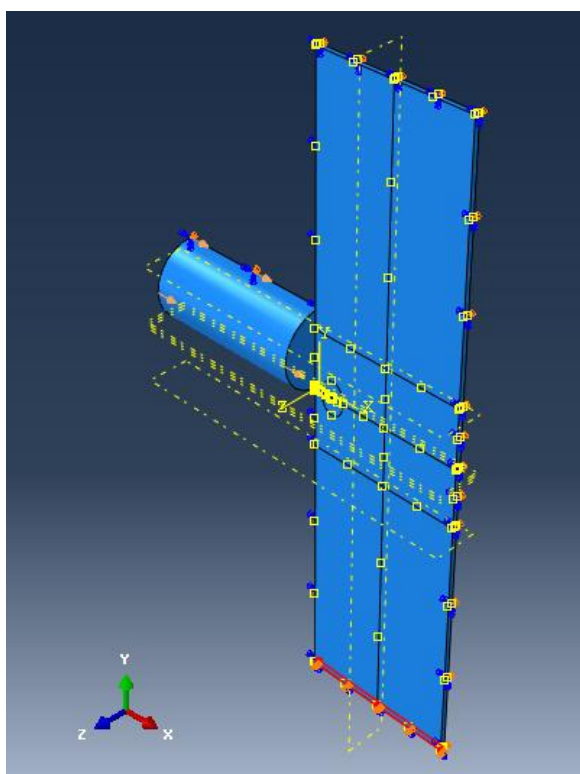


Figura 27. Coacciones externas de la probeta

4.3.3.5 Mallado

El último paso antes de proceder a la simulación de los correspondientes casos es el mallado. Este paso tiene una gran importancia ya que la solución final del modelo depende de la calidad del mallado realizado. Cabe destacar que, por un lado, a medida que se aumenta el número de elementos la solución numérica se aproxima cada vez más a la solución real. Por otro lado, a medida que se aumenta el número de elementos, aumenta considerable el tiempo de solución. Por ello, el objetivo al mallar es encontrar una solución que mantenga un equilibrio entre coste computacional y precisión de los resultados.

Han de definirse una serie de aspectos relacionados con el mallado empleado en el modelo. En primer lugar, se define la forma de los elementos, en este caso hexaédricos de 6 caras por ser los más adecuados para sólidos tridimensionales de geometría sencilla. En segundo lugar, se define la técnica de mallado, estructurada en este caso. Por último, se define el tipo de elemento, en este caso cubo de 8 nodos térmicamente acoplados "C3D8RT" para la probeta y no térmicamente acoplado "C3D8R" para el proyectil (ver Figura 28).

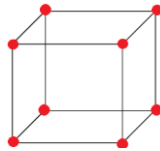


Figura 28. Cubo lineal de 8 nodos C3D8R

PROYECTIL

Antes de mallar el proyectil se procede a realizar el sembrado de los bordes que conforman la pieza (ver Figura 29). Para realizar el sembrado de los mismos existen dos opciones:

- Definir el tamaño de los elementos que forman el borde.
- Definir el número de elementos en dicho borde.

En ambos casos se puede utilizar la opción denominada bias, con ella Abaqus nos permite realizar un sembrado progresivo a lo largo del eje, esto ayuda a definir un menor tamaño de elemento en aquellas zonas en las que va a existir una mayor concentración de tensiones, o zonas de mayor interés a la hora de obtener resultados más precisos. Para ello se ha de establecer un tamaño mínimo y un tamaño máximo de elementos (primera opción) o el número de elementos en el borde y un ratio que usará Abaqus para variar el tamaño de los mismos proporcionalmente (segunda opción).

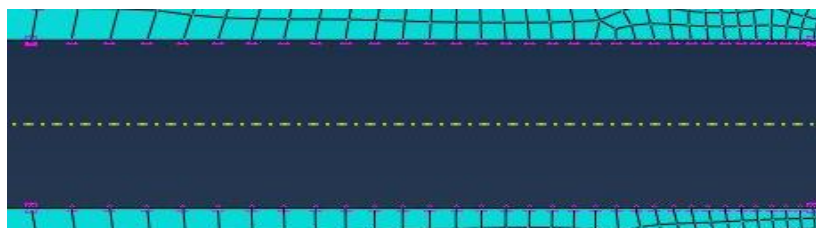


Figura 29. Ejemplo de borde sembrado

Una vez establecido el sembrado de los bordes del proyectil se realiza el mallado del mismo:

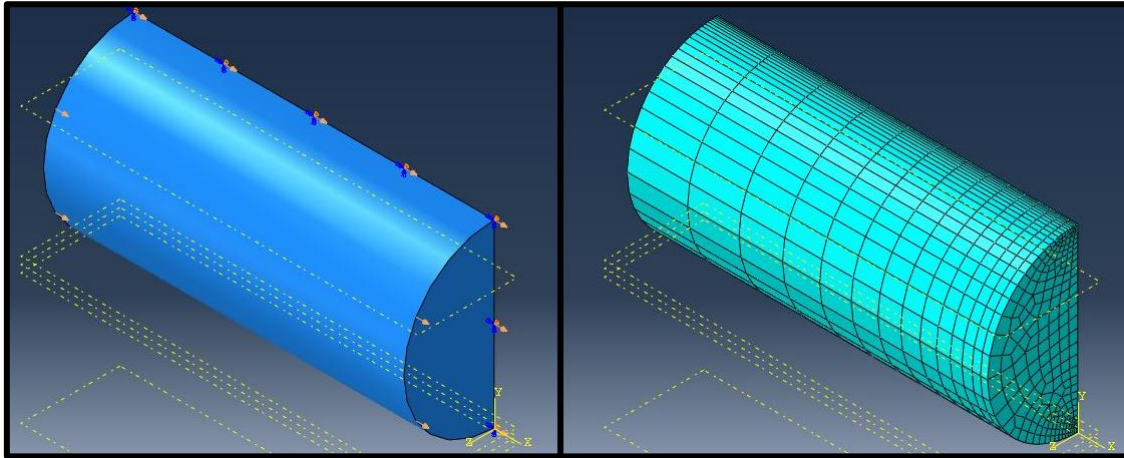


Figura 30. Mallado del proyectil

PROBETA

Para cumplir con el equilibrio coste computacional/precisión de resultados, se han realizado una serie de particiones en la probeta para posteriormente aplicar un mallado de mayor o menor número de elementos según requieran las distintas zonas del modelo. Cabe prestar especial atención a la zona próxima a la entalla en la que se ha de realizar un mallado más preciso. Esta zona consta a su vez de una partición elíptica y una partición circular (ver Figura 31 y Figura 32).

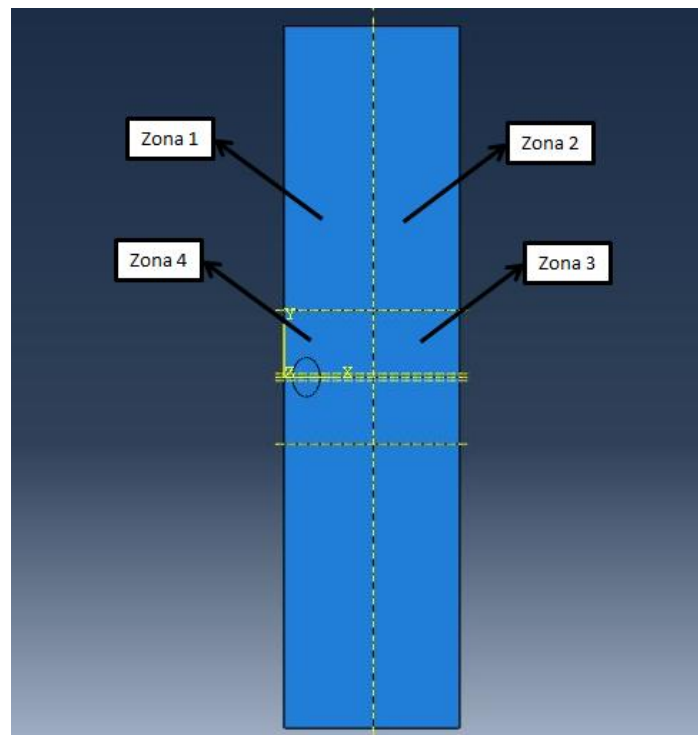


Figura 31. Particiones realizadas sobre la probeta

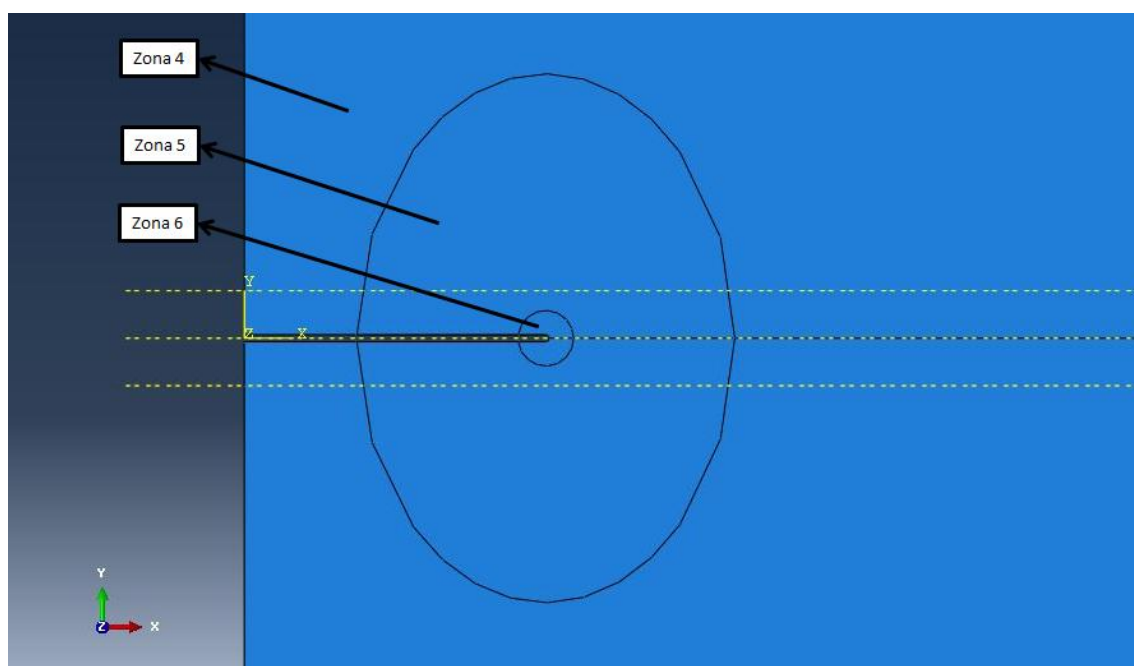


Figura 32. Detalle de las particiones realizadas en la zona próxima a la entalla

Una vez realizadas las particiones y definidas las zonas se procede al sembrado de los bordes de las mismas. A continuación se exponen los datos del sembrado realizado en los bordes de las distintas zonas especificadas:

ZONA	Borde	Bias	Tamaño (mm)	Número de elementos
1	Horizontal	No	3	17
	Vertical	Simple	Mín: 4 Máx: 12	Mín: 22 Ratio: 3.02948
2	Horizontal	No	10	5
	Vertical	Simple	Mín: 4 Máx: 12	Mín: 22 Ratio: 3.02948
3	Horizontal	No	10	5
	Vertical	No	3	13
4	Horizontal	No	3	17
	Vertical	No	3	13
	Longitudinal de la entalla	Simple	Mín: 0.6 Máx: 1	Mín: 6 Ratio: 1.67939
5	Elíptico exterior	No	0,3	100
	Circular interior	No	0,06	59
	Longitudinal de la entalla	Simple	Mín: 0.06 Máx: 0.3	Mín: 6 Ratio: 1.67939
6	Circular exterior	No	0.06	Mín :45 Ratio: 5.06772
	Circular interior	No	0.02	12
	Longitudinal de la entalla	Simple	Mín: 0.02 Máx: 0.06	Mín: 32 Ratio: 2.96807

Tabla 6. Datos del sembrado en los bordes de las distintas particiones

Una vez establecido el sembrado de los bordes de la probeta se realiza el mallado de la misma:

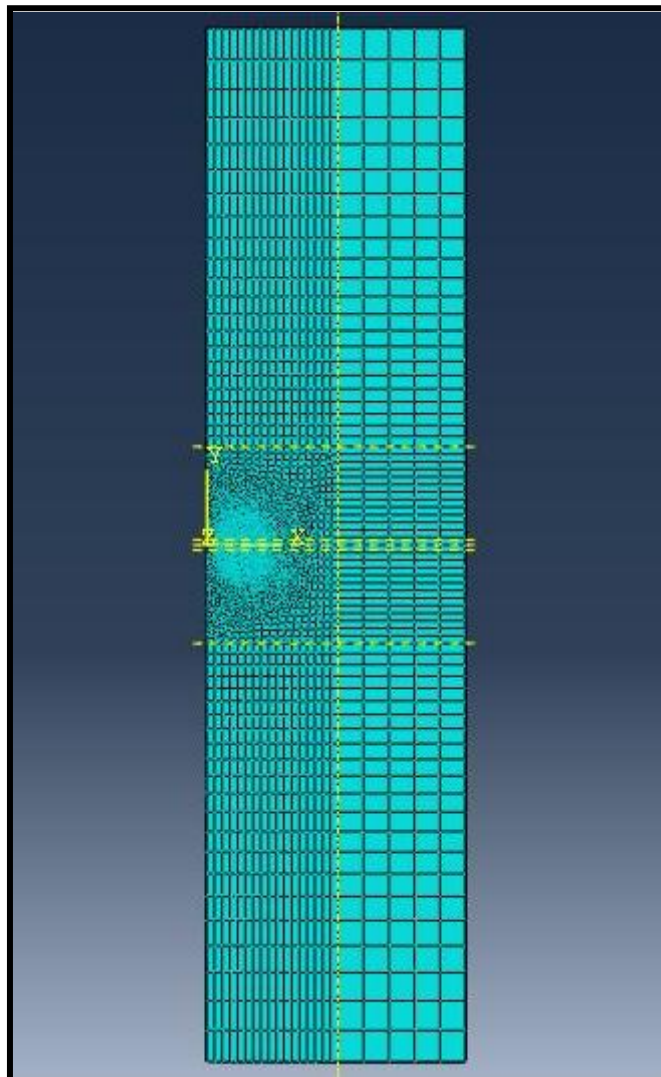


Figura 33. Mallado de la probeta

Como se puede observar en el mallado de la Figura 34, se ha incluido también un bias que disminuye el tamaño de los elementos según se van acercando a la superficie libre (externa) de la probeta. Esto es debido a que es en esta zona donde se van a producir unos mayores gradientes de tensiones.

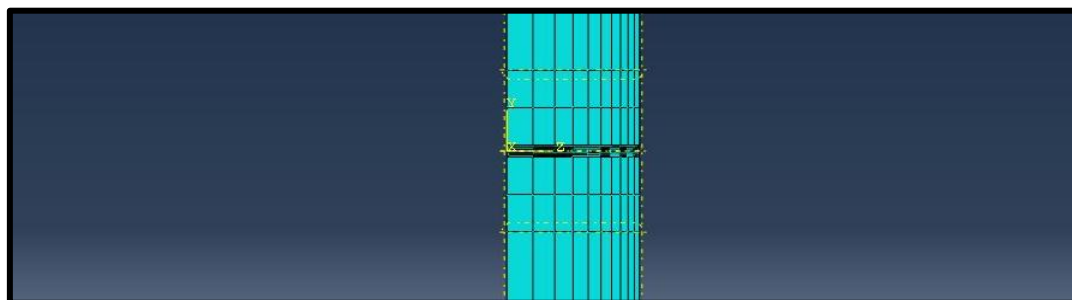


Figura 34. Detalle del mallado en el espesor de la probeta

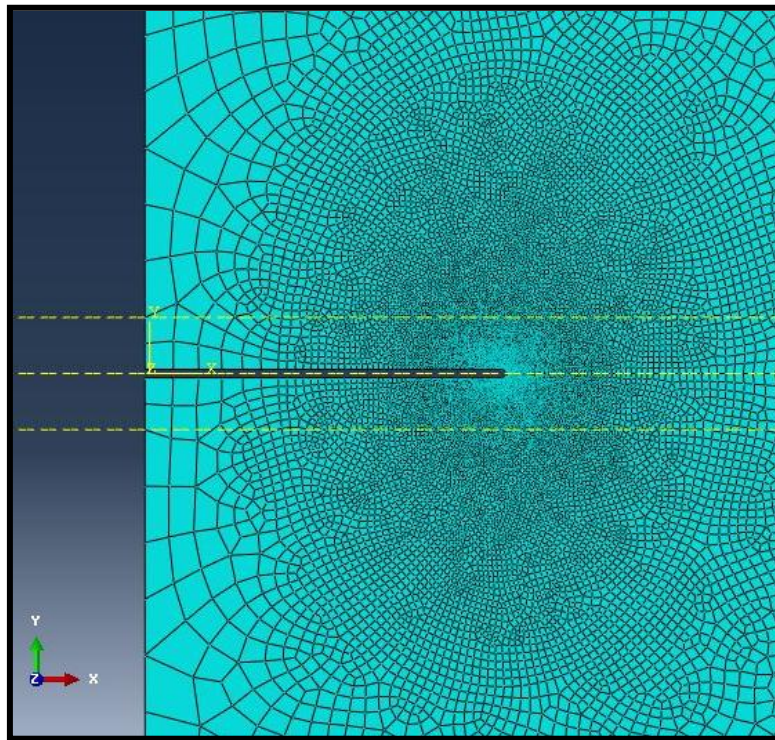


Figura 35. Detalle del mallado en la zona próxima a la entalla

En la Tabla 7 se encuentra el resumen, tanto para el proyectil como para la probeta, de los datos en cuanto a nodos y elementos del mallado:

	Número de Nodos	Número de Elementos	Tipo de elemento
Proyectil	3990	3220	C3D8R
Probeta	183678	165030	C3D8RT

Tabla 7. Datos del mallado de los elementos

4.3.3.6 Resolución del modelo

Después de introducir el archivo de entrada en el programa, se procede a la resolución del modelo. Esta fase es interna y en ella Abaqus no interacciona con el usuario. En la Figura 36 se muestra el módulo *job* de Abaqus con los distintos modelos que van a ser analizados, donde *b* corresponde al espesor de la probeta en milímetros y *h* a la altura de impacto en milímetros tomando como referencia el borde superior de la entalla.

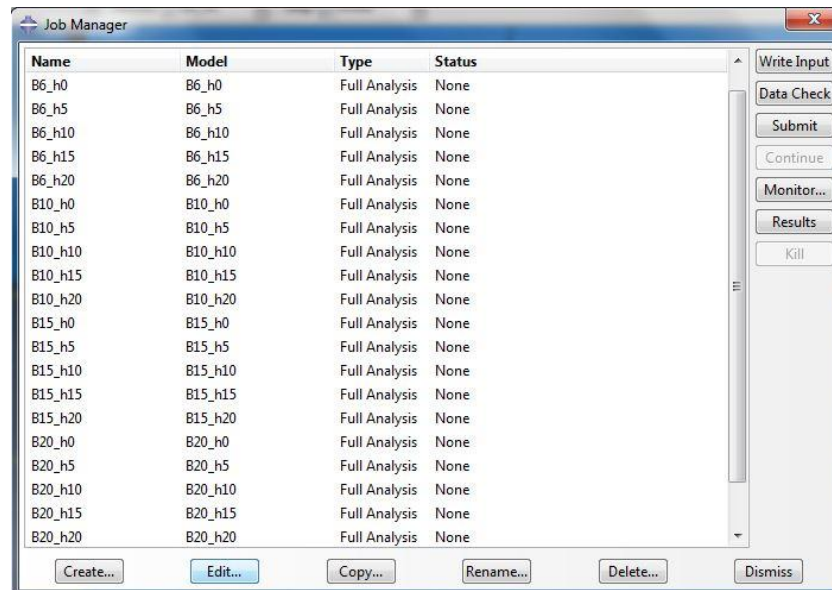


Figura 36. Módulo *job* con los distintos modelos que componen los casos

5. RESULTADOS

Tras la simulación en Abaqus de los distintos casos (ver Tabla 8), se analizan los resultados de dichas simulaciones. La visualización y análisis de los resultados se corresponde con la etapa de postproceso del método de elementos finitos.

CASOS ANALIZADOS			
Código del caso	Espesor de la probeta (mm)	Altura de impacto (mm)	Velocidad de impacto (m/s)
B6_h0_V40	6	0	40
B6_h0_V60			60
B6_h5_V40		5	40
B6_h5_V60			60
B6_h5_V80			80
B6_h5_V120			120
B6_h10_V40		10	40
B6_h10_V60			60
B6_h10_V80			80
B6_h10_V120			120
B6_h15_V40		15	40
B6_h15_V60			60
B6_h15_V80			80
B6_h15_V120			120
B6_h20_V40		20	40
B6_h20_V60			60
B6_h20_V80			80
B6_h20_V120			120
B10_h0_V40	10	0	40
B10_h0_V80			80
B10_h0_V120			120
B10_h5_V40		5	40
B10_h5_V80			80
B10_h5_V120			120
B10_h10_V40		10	40
B10_h10_V80			80
B10_h10_V120			120
B10_h15_V40		15	40
B10_h15_V80			80
B10_h15_V120			120
B10_h20_V40		20	40
B10_h20_V80			80
B10_h20_V120			120

B15_h0_V40	15	0	40
B15_h0_V80			80
B15_h0_V120			120
B15_h5_V40		5	40
B15_h5_V80			80
B15_h5_V120			120
B15_h10_V40		10	40
B15_h10_V80			80
B15_h10_V120			120
B15_h15_V40		15	40
B15_h15_V80			80
B15_h15_V120			120
B15_h20_V40		20	40
B15_h20_V80			80
B15_h20_V120			120

Tabla 8. Listado de los distintos casos analizados

Antes de comenzar a analizar los resultados de los distintos casos se ha de validar del modelo numérico.

5.1. Validación del modelo

Para poder validar el modelo es necesario analizar los casos B6_h0_V40 y B6_h0_V60. Tanto la geometría como las condiciones impuestas de estos dos modelos son una reproducción numérica de los ensayos experimentales realizados por Ravi Chandar en su estudios [2] y [14], aquellos analizados en el punto 3 (*Resultados experimentales de validación*).

Modo de fallo frágil

En la Figura 37 se observan los resultados de un impacto a velocidad 40 m/s donde aparece una fractura frágil modo-I. Tanto para el resultado numérico como para el experimental aparecen dos propagaciones de grieta (B y L en la figura). En primer lugar aparece la grieta B, tanto en el modelo numérico como en el ensayo experimental de Ravi Chandar esta grieta se propaga formando un ángulo aproximado de 70° con la horizontal, momento en el que se alcanza la tensión principal máxima. Posteriormente aparece la grieta L debido a la interacción de la onda reflejada con el final de la entalla tras el impacto. Dicha grieta se propaga en sentido especular al de la grieta B.

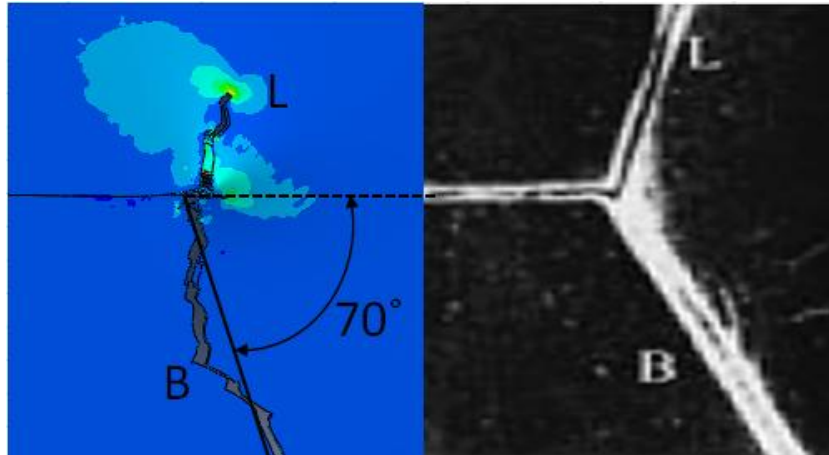


Figura 37. Modo de fallo frágil. Resultado numérico (Izq.) y resultado experimental (dcha.) [14]

Modo de fallo dúctil

En la Figura 38 se observan los resultados de un impacto a velocidad 60 m/s donde aparece una fractura dúctil por bandas adiabáticas de cortadura. Tanto para el resultado numérico como para el experimental aparece una única grieta que se propaga formando un ángulo aproximado de 10° con la horizontal, momento en el que se alcanza la máxima deformación plástica y máximo aumento de temperatura. Esta grieta deja de propagarse tras avanzar pocos milímetros.

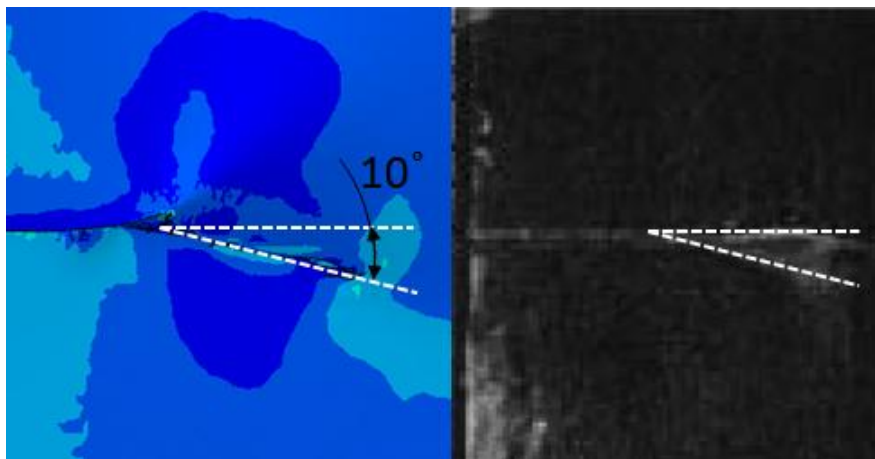


Figura 38. Modo de fallo dúctil. Resultado numérico (Izq.) y resultado experimental (dcha.) [10]

Se puede concluir que, cumpliendo con los objetivos del proyecto, se ha sido capaz de reproducir cualitativamente los resultados experimentales publicados por Ravi Chandar en sus estudios [2] y [14]. Por un lado, se obtienen direcciones de propagación de grieta similares tanto para el caso B6_h0_V40, donde aparece un modo de fallo frágil, como para el caso B6_h0_V60, donde aparece un modo de fallo dúctil. Por otro lado, la velocidad de impacto a la que ocurre la transición del modo de fallo frágil al dúctil se localiza en un rango de valores de entre 40 y 60 m/s, lo que concuerda con la velocidad de 55 m/s que fija Ravi Chandar como velocidad de transición en su estudio.

Una vez validado el modelo se procede al análisis de las particularidades encontradas en los distintos casos.

5.2. Influencia de los parámetros del problema sobre la velocidad de deformación

Al estar estudiando el comportamiento de un material termoplástico, el policarbonato, el cual se ve afectado por la velocidad de deformación, resulta muy interesante el análisis de la influencia de los distintos parámetros del problema sobre dicha velocidad.

La velocidad de deformación se ha calculado en la zona del extremo de la entalla resaltada en la Figura 39.

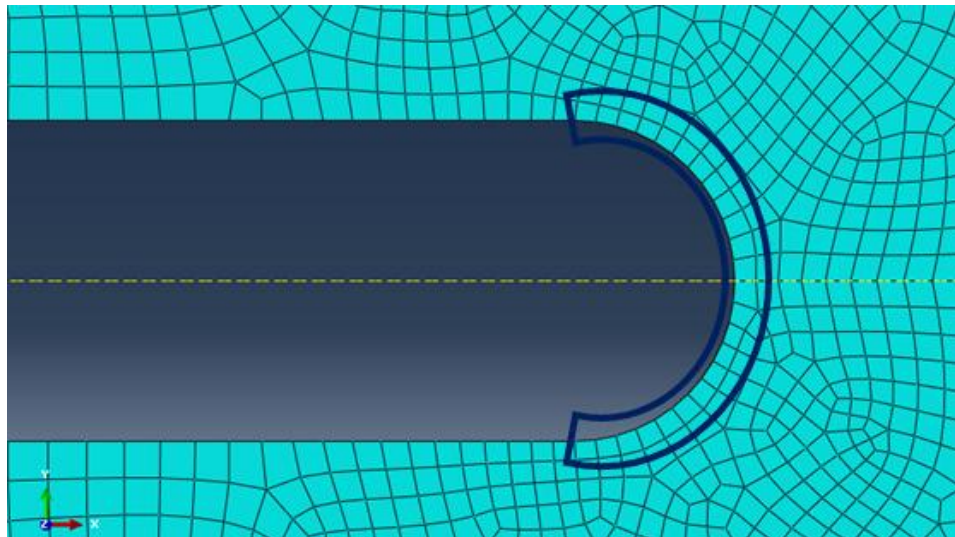


Figura 39. Zona del extremo de la entalla para el cálculo de velocidad de deformación

En la Tabla 9 se presentan los resultados de velocidad de deformación de los distintos casos.

VELOCIDAD DE DEFORMACIÓN EN LOS DISTINTOS CASOS				
Código del caso	Espesor de probeta (mm)	Altura de impacto (mm)	Velocidad de impacto (m/s)	Velocidad de Deformación (s^{-1})
B6_h0_V40	6	0	40	27983
B6_h0_V60			60	40401
B6_h5_V40		5	40	19713
B6_h5_V60			60	31556
B6_h5_V80			80	46763
B6_h5_V120			120	64952
B6_h10_V40		10	40	6774
B6_h10_V60			60	14993

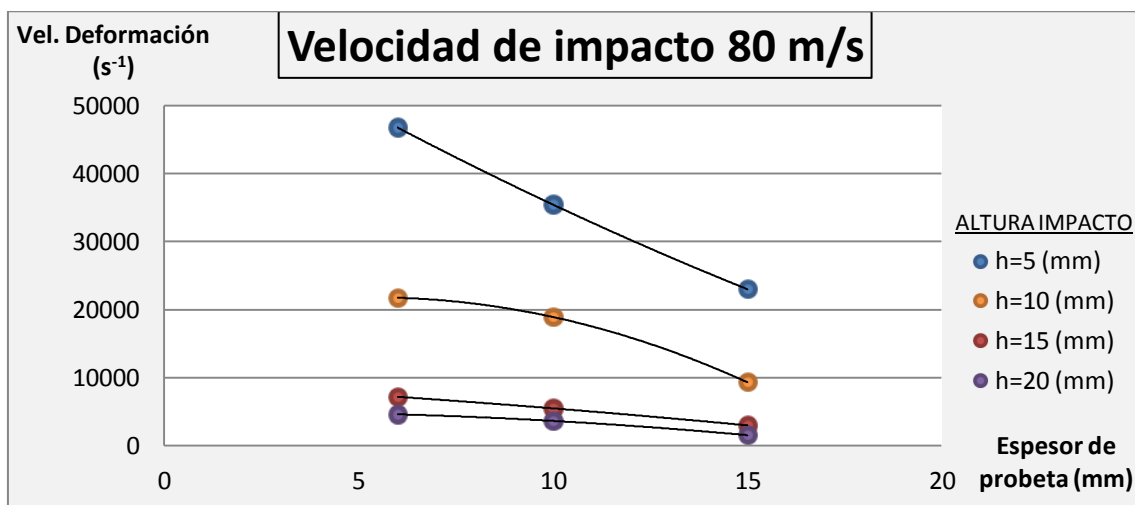
B6_h10_V80			80	21742
B6_h10_V120			120	34236
B6_h15_V40		15	40	2145
B6_h15_V60			60	3952
B6_h15_V80			80	7183
B6_h15_V120			120	13049
B6_h20_V40		20	40	1927
B6_h20_V60			60	3087
B6_h20_V80			80	4614
B6_h20_V120			120	6884
B10_h0_V40	10	0	40	23935
B10_h0_V80			80	46153
B10_h0_V120			120	52378
B10_h5_V40		5	40	14788
B10_h5_V80			80	35439
B10_h5_V120			120	43512
B10_h10_V40		10	40	5075
B10_h10_V80			80	18913
B10_h10_V120			120	30199
B10_h15_V40		15	40	1780
B10_h15_V80			80	5486
B10_h15_V120			120	14698
B10_h20_V40		20	40	1537
B10_h20_V80			80	3645
B10_h20_V120			120	8125
B15_h0_V40	15	0	40	13221
B15_h0_V80			80	23010
B15_h0_V120			120	30411
B15_h5_V40		5	40	7795
B15_h5_V80			80	20602
B15_h5_V120			120	25263
B15_h10_V40		10	40	2489
B15_h10_V80			80	9322
B15_h10_V120			120	14297
B15_h15_V40		15	40	1021
B15_h15_V80			80	2988
B15_h15_V120			120	7784
B15_h20_V40		20	40	719
B15_h20_V80			80	1544
B15_h20_V120			120	3531

Tabla 9. Velocidad de deformación en los distintos casos analizados

Para una mayor compresión, se han elaborado una serie de gráficas que relacionan espesor de probeta, velocidad de impacto y altura de impacto con la velocidad de deformación.

➤ Relación espesor de probeta con velocidad de deformación:

En la Gráfica 3 se observa una comparación de los datos de la Tabla 9 que representa la relación entre espesor de probeta y velocidad de deformación para cada altura de impacto. De ella podemos deducir que la velocidad de deformación disminuye notablemente a medida que aumenta el espesor de probeta, siendo menor dicha reducción, cuanto mayor es la altura de impacto.



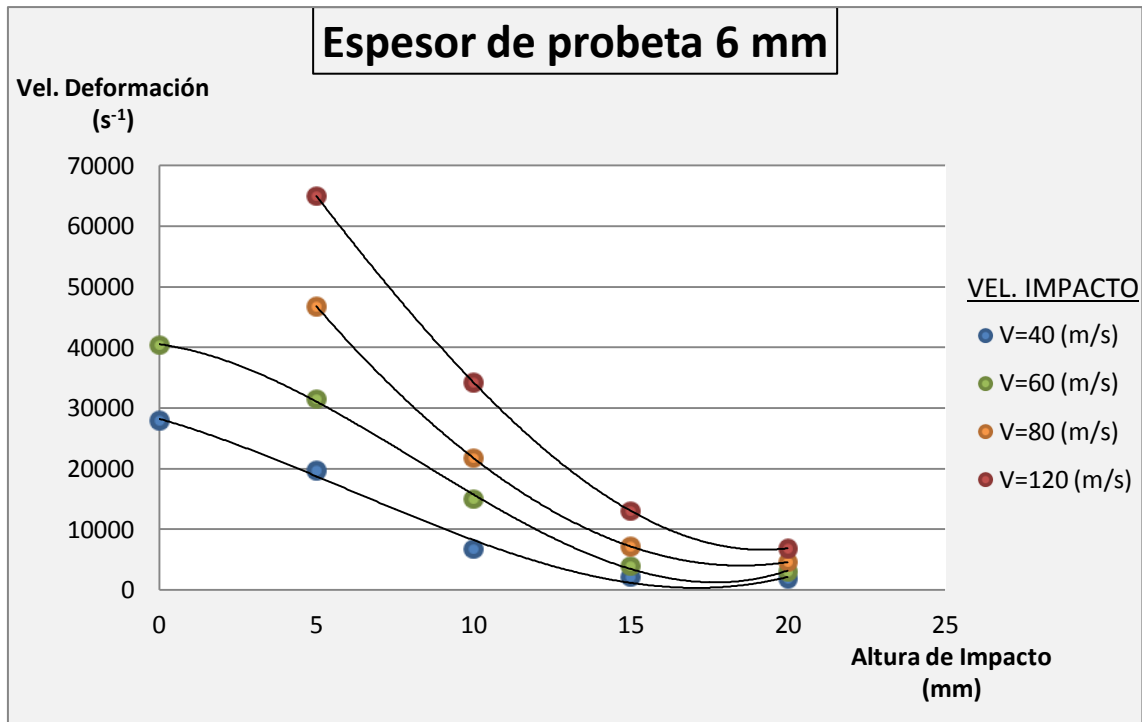
Gráfica 3. Relación entre espesor de probeta, altura de impacto y velocidad de deformación para velocidad de impacto 80 m/s

➤ Relación velocidad de impacto y altura de impacto con velocidad de deformación:

En la Gráfica 4, Gráfica 5 y Gráfica 6 se observa una comparación de los datos de la Tabla 9. Concretamente se representa la relación entre altura de impacto y velocidad de deformación para cada velocidad de impacto.

En estas gráficas observamos que para los tres espesores:

- La velocidad de deformación aumenta a medida que aumenta la velocidad de impacto.
- La velocidad de deformación disminuye notablemente a medida que aumenta la altura de impacto.



Gráfica 4. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 6 mm

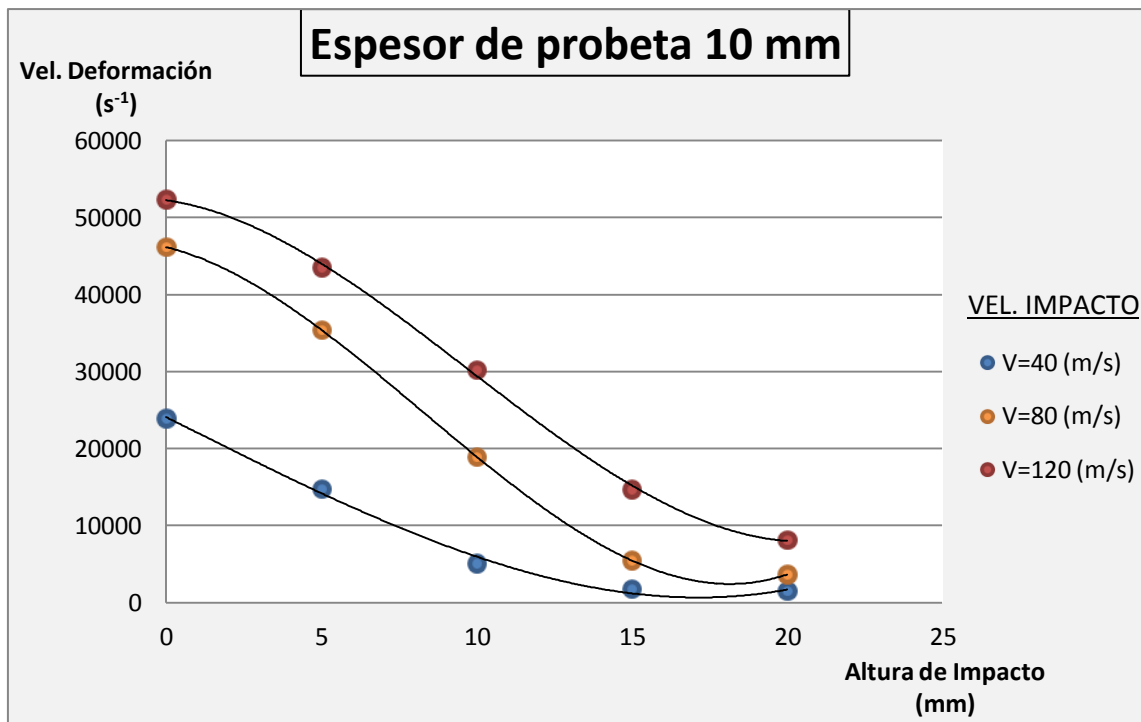
Las ecuaciones que rigen la relación velocidad de deformación – altura de impacto para espesor de probeta 6 mm y velocidades de impacto 40, 60, 80 y 120 m/s respectivamente se presentan a continuación. Estas ecuaciones sólo son válidas para el rango de alturas de impacto analizado.

$$V_{def_{40}} = 7,324 h_{imp}^3 - 29,14 h_{imp}^2 - 6987,8 h_{imp} + 99704 \quad (17)$$

$$V_{def_{60}} = 2,0373 h_{imp}^3 + 148,12 h_{imp}^2 - 7582,5 h_{imp} + 80718 \quad (18)$$

$$V_{def_{80}} = 11,93 h_{imp}^3 - 2965,53 h_{imp}^2 - 707,14 h_{imp} + 40524 \quad (19)$$

$$V_{def_{120}} = 6,054 h_{imp}^3 - 111,87 h_{imp}^2 - 1487,1 h_{imp} + 28224 \quad (20)$$



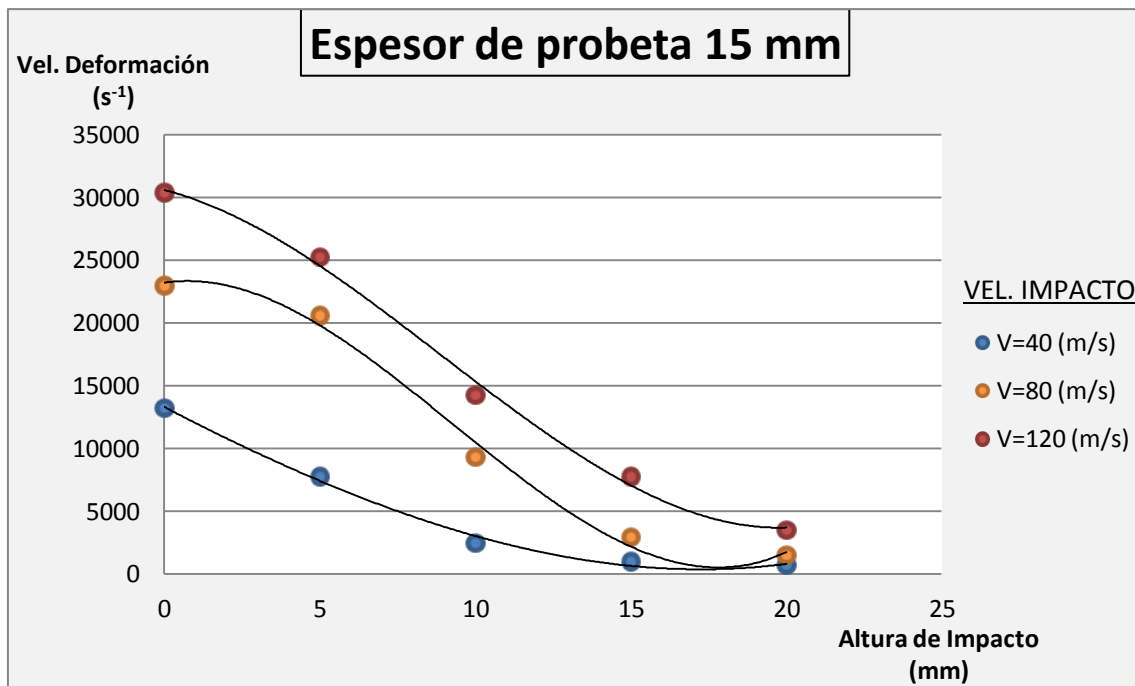
Gráfica 5. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 10 mm

Las ecuaciones que rigen la relación velocidad de deformación – altura de impacto para espesor de probeta 10 mm y velocidades de impacto 40, 80 y 120 m/s respectivamente se presentan a continuación. Estas ecuaciones sólo son válidas para el rango de alturas de impacto analizado.

$$V_{def_{40}} = 8,9171 h_{imp}^3 - 260,66 h_{imp}^2 - 566,28 h_{imp} + 52251 \quad (21)$$

$$V_{def_{80}} = 11,599 h_{imp}^3 - 288,41 h_{imp}^2 - 996,82 h_{imp} + 46159 \quad (22)$$

$$V_{def_{120}} = 2,411 h_{imp}^3 - 3,1104 h_{imp}^2 - 2022,1 h_{imp} + 24083 \quad (23)$$



Gráfica 6. Relación entre velocidad de impacto, altura de impacto y velocidad de deformación para espesor de probeta 15 mm

Las ecuaciones que rigen la relación velocidad de impacto – altura de impacto para espesor de probeta 15 mm y velocidades de impacto 40, 80 y 120 m/s respectivamente se presentan a continuación. Estas ecuaciones sólo son válidas para el rango de alturas de impacto analizado.

$$V_{def_{40}} = 5,3857 h_{imp}^3 - 143,74 h_{imp}^2 - 623,6 h_{imp} + 30589 \quad (24)$$

$$V_{def_{80}} = 9,1749 h_{imp}^3 - 255,61 h_{imp}^2 + 368,93 h_{imp} + 23208 \quad (25)$$

$$V_{def_{120}} = 0,6964 h_{imp}^3 - 19,355 h_{imp}^2 - 1290,8 h_{imp} + 13313 \quad (26)$$

5.3. Análisis de los distintos modos de fallo

Una vez observada la influencia de parámetros sobre la velocidad de deformación se procede al análisis de las particularidades encontradas en los modos de fallo que aparecen en los distintos casos.

5.3.1. Casos sin fractura del material

En primer lugar, se han de destacar aquellos casos en los que no se produce fractura del material. Esta ausencia de fallo es debida a una baja velocidad de impacto, 40 m/s, combinada con alto espesor de probeta, 10 y 15 mm, y altura de impacto distinta de cero (ver Tabla 10).

CASOS SIN FRACTURA DEL MATERIAL			
Código del caso	Espesor de la probeta (mm)	Altura de impacto (mm)	Velocidad de impacto (m/s)
B10_h5_V40	10	5	40
B10_h10_V40		10	40
B10_h15_V40		15	40
B10_h20_V40		20	40
B15_h5_V40	15	5	40
B15_h10_V40		10	40
B15_h15_V40		15	40
B15_h20_V40		20	40

Tabla 10. Casos sin fractura del material

5.3.2. Casos con modo de fallo frágil

Los primeros casos con fallo en el material que se tratan son aquellos en los que aparece modo de fallo frágil, el cual se basa en un criterio de fallo local definido por la tensión máxima principal del material. A continuación se presentan los distintos casos en los que aparece dicho modo de fallo (ver Tabla 12).

CASOS CON APARICIÓN DE MODO DE FALLO FRÁGIL			
Código del caso	Espesor de la probeta (mm)	Altura de impacto (mm)	Velocidad de impacto (m/s)
B6_h0_V40	6	0	40
B6_h5_V40		5	40
B6_h5_V60			60
B6_h5_V120			120

B6_h10_V40		10	40
B6_h10_V60			60
B6_h10_V80			80
B6_h10_V120			120
B6_h15_V40		15	40
B6_h15_V60			60
B6_h15_V80			80
B6_h15_V120			120
B6_h20_V40		20	40
B6_h20_V60			60
B6_h20_V80			80
B6_h20_V120			120
B10_h0_V40	10	0	40
B10_h0_V120			120
B10_h5_V40		5	40
B10_h5_V80			80
B10_h5_V120			120
B10_h10_V80		10	80
B10_h10_V120			120
B10_h15_V80		15	80
B10_h15_V120			120
B10_h20_V80		20	80
B10_h20_V120			120
B15_h0_V40	15	0	40
B15_h0_V80			80
B15_h0_V120			120
B15_h5_V80		5	80
B15_h5_V120			120
B15_h10_V80		10	80
B15_h10_V120			120
B15_h15_V80		15	80
B15_h15_V120			120
B15_h20_V80		20	80
B15_h20_V120			120

Tabla 11. Casos con aparición de modo de fallo frágil

Dentro de los distintos casos con modo de fallo frágil se observan distintos comportamientos que pueden ser agrupados en tres grandes bloques:

Comportamiento tipo A

Los casos con comportamiento tipo A presentan una única propagación de grieta de tipo frágil que se propaga aproximadamente a 70° con la horizontal. Este tipo de comportamiento se observa en numerosos casos como por ejemplo el caso B6_h15_V60 cuyo resultado puede verse en la Figura 40.

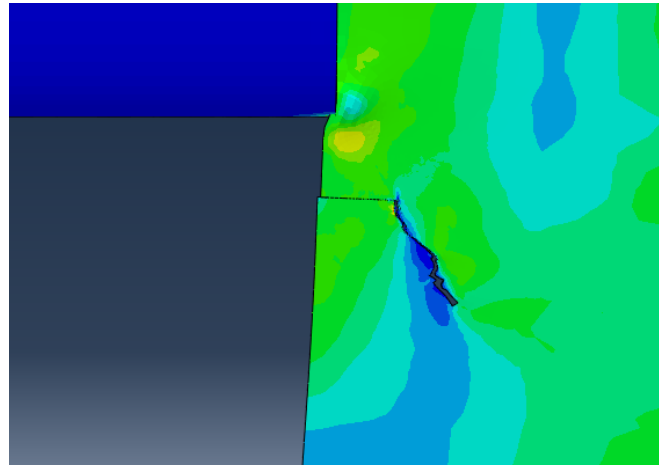


Figura 40. Caso representativo de Comportamiento Tipo A (B6_h15_V60)

Comportamiento tipo B

Estos casos presentan una primera fractura de tipo frágil que se propaga aproximadamente a 70° con la horizontal. Posteriormente aparece una segunda grieta, también de tipo frágil, debido a la interacción de la onda reflejada tras el impacto con el final de la entalla. Dicha grieta se propaga en sentido especular al de la primera grieta. Uno de los casos más representativos de este comportamiento es el utilizado para la validación del modelo (B6_h0_V40) cuyo resultado puede verse en la Figura 41.

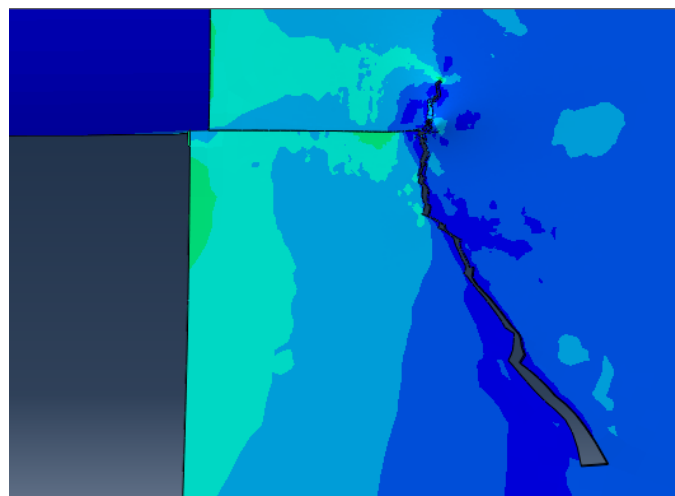


Figura 41. Caso representativo de Comportamiento Tipo B (B6_h0_V40)

Comportamiento tipo C

Se trata de casos con velocidad de impacto 120 m/s. En dichos casos el proyectil comienza a fracturar la probeta en la zona de impacto para posteriormente producir dos grietas frágiles que se propagan en dirección opuesta a unos 70° con respecto a la horizontal. Debido a la elevada velocidad, presentan un modo de fallo frágil que resulta en el desprendimiento de un pedazo de probeta como el que se puede observar en la Figura 42.

Este tipo de casos no pueden considerarse como representativos. Esto es debido a que el efecto concentrador de tensiones en la entalla no puede evaluarse de igual forma que en el resto de casos debido a la primera fractura que se produce en la zona de impacto del proyectil.

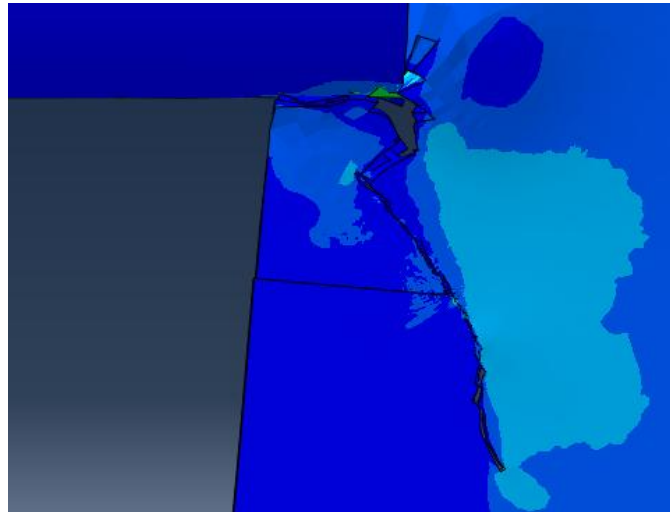


Figura 42. Caso representativo de Comportamiento Tipo C (B10_h15_V120)

De los casos con fallo frágil es interesante resaltar los ángulos de propagación de la grieta. A continuación, se pueden observar distintas imágenes representativas que sirven de muestra para analizar como varía el ángulo en función del espesor de la probeta y altura de impacto.

- Por un lado, tanto en la Figura 43 como en la Figura 44 y Figura 45, se observa como para un mismo espesor aparece un ligero aumento del ángulo inicial de propagación con la altura de impacto.

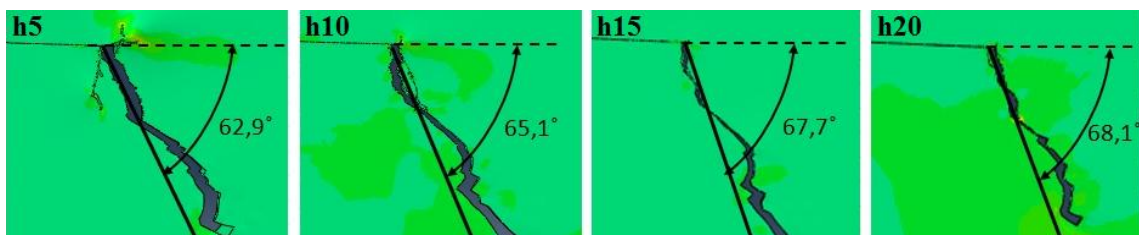


Figura 43. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=6mm y V=60m/s

- Por otro lado, tanto en la Figura 44 y Figura 45 como en la Gráfica 7 se observa como al aumentar el espesor de la probeta y manteniendo la velocidad de impacto, 80 m/s en este caso, se produce una disminución del ángulo inicial de propagación de la grieta.

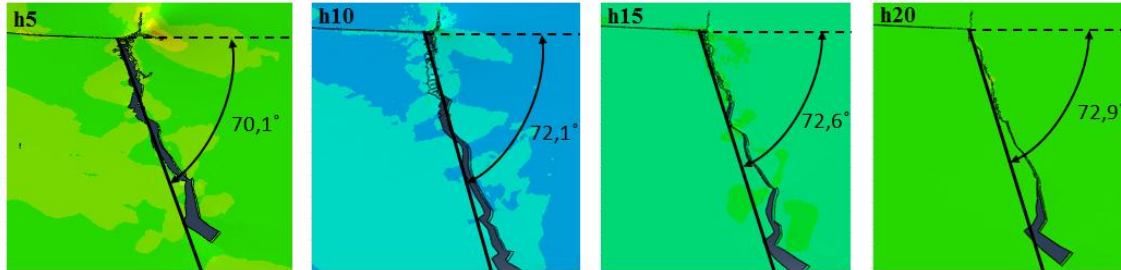


Figura 44. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=10mm y V=80m/s

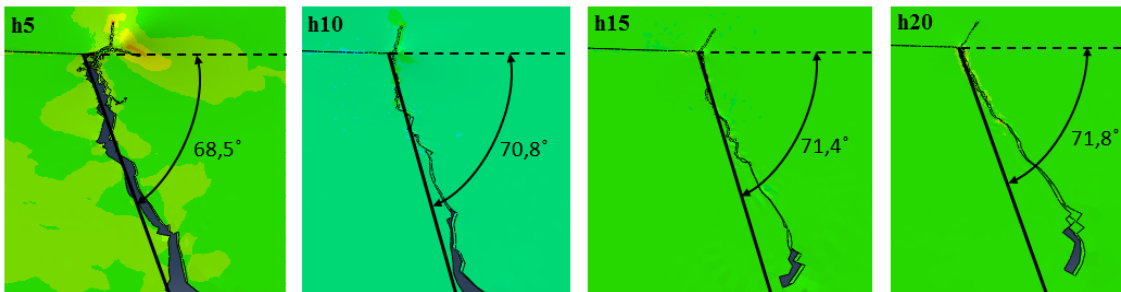
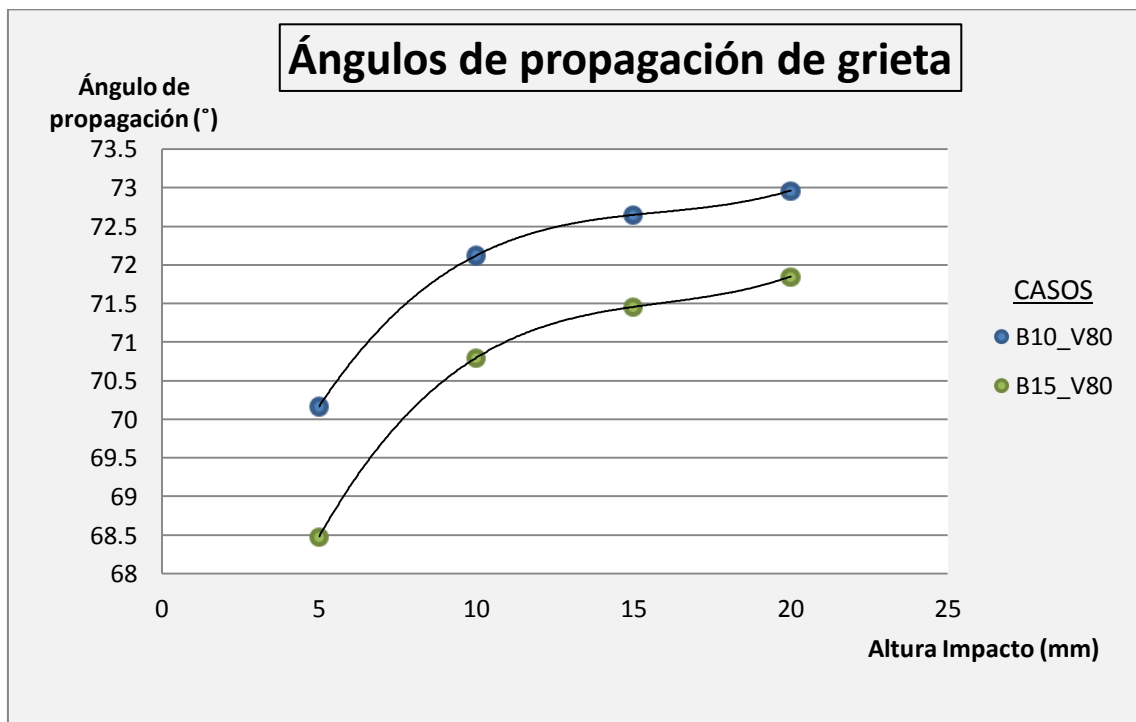


Figura 45. Ángulos de propagación de grieta para casos con B=15mm y V=80m/s



Gráfica 7. Variación del ángulo de propagación con la altura de impacto

5.3.3. Casos con aparición de modo de fallo dúctil

A continuación se presentan los distintos casos en los que aparece modo de fallo dúctil (ver Tabla 12).

CASOS CON APARICIÓN DE MODO DE FALLO DÚCTIL			
Código del caso	Espesor de la probeta (mm)	Altura de impacto (mm)	Velocidad de impacto (m/s)
B6_h0_V60	6	0	60
B6_h5_V80		5	80
B10_h0_V80	10	0	80

Tabla 12. Casos con aparición de modo de fallo dúctil

En los casos con modo de fallo dúctil, ha de aparecer deformación plástica así como una variación de temperatura en los elementos que forman el borde de la grieta. Dichos cambios pueden observarse en las distintas imágenes que se encuentran a continuación.

Caso B6_h0_V60

Se trata de un caso con espesor de probeta 6 mm, altura de impacto 0 mm y velocidad de impacto 60 m/s. Tras el impacto aparece una única grieta que se propaga formando un ángulo aproximado de 10° con la horizontal, momento en el que se alcanza la máxima deformación plástica y máximo aumento de temperatura. Esta grieta deja de propagarse tras avanzar 4.8 mm. En la Figura 46 se observa claramente la aparición de deformación plástica (PEEQ en la leyenda) y en la Figura 47 un aumento de temperatura de 27 K. Estos dos datos confirman el modo de fallo como dúctil.

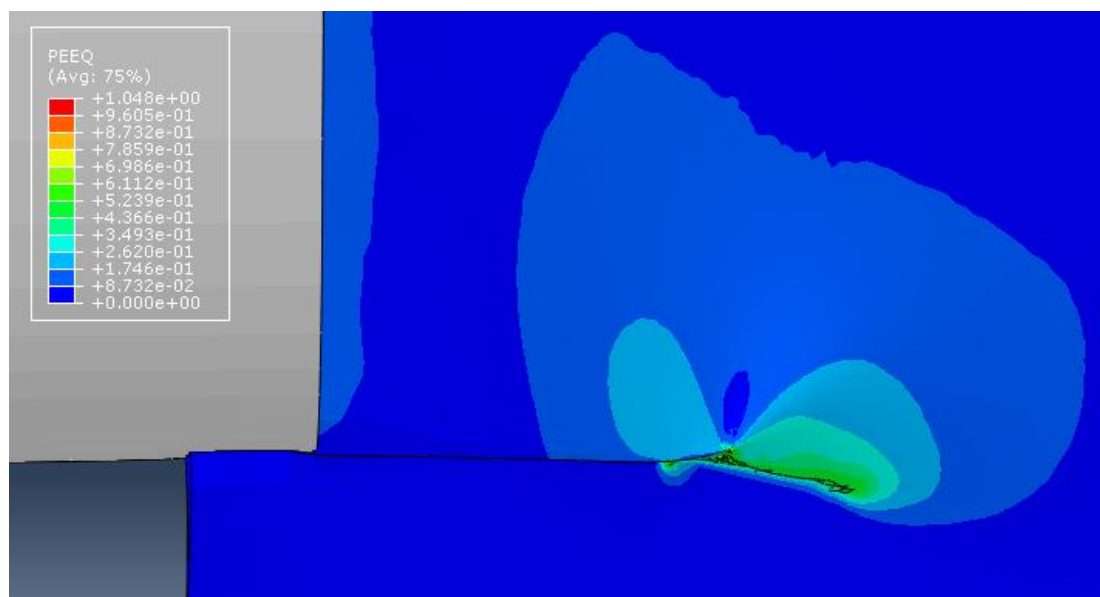


Figura 46. Deformación plástica caso B6_h0_V60

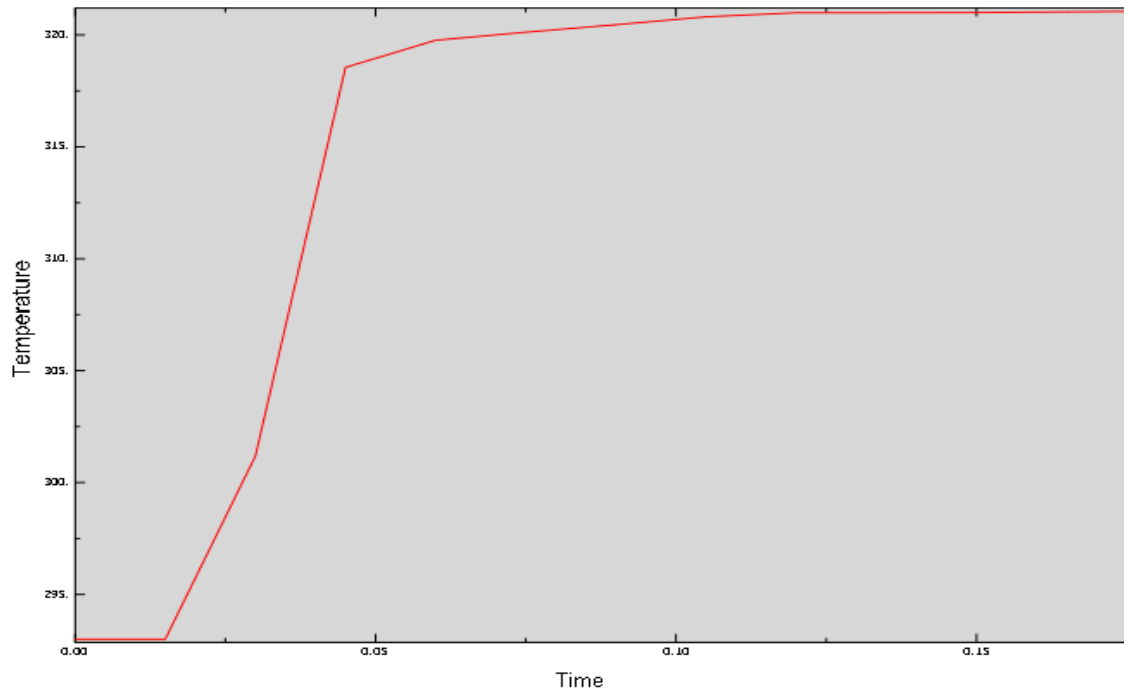


Figura 47. Variación de temperatura del elemento número 114532

Caso B6_h5_V80

Se trata de un caso con espesor de probeta 6 mm, altura de impacto 5 mm y velocidad de impacto 80 m/s. Al igual que en el caso anterior aparece una única grieta que se propaga formando un ángulo aproximado de 10° con la horizontal, momento en el que se alcanza la máxima deformación plástica y máximo aumento de temperatura. Esta grieta deja de propagarse tras avanzar 2.1 mm. En la Figura 48 se observa claramente la aparición de deformación plástica (PEEQ en la leyenda) y en la Figura 49 un aumento de temperatura de 27 K, confirmando de nuevo el modo de fallo dúctil.

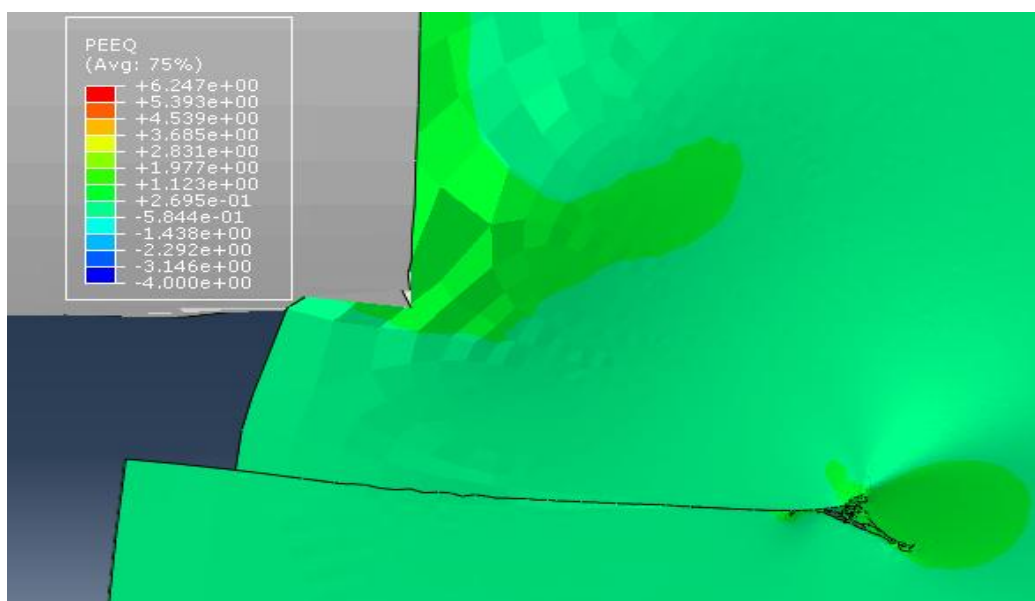


Figura 48. Deformación plástica caso B6_h5_V80

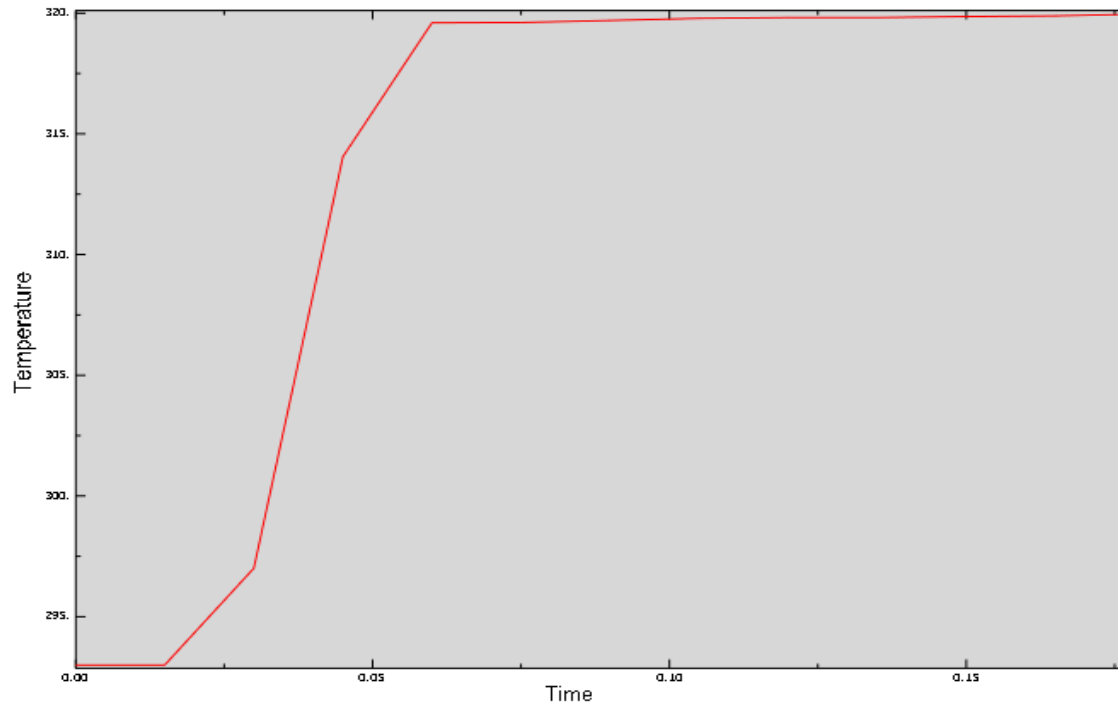


Figura 49. Variación de temperatura del elemento número 112410

Caso B10_h0_V80

Se trata de un caso con espesor de probeta 10 mm, altura de impacto 0 mm y velocidad de impacto 80 m/s. En este caso a diferencia de los anteriores aparece una primera grieta que tras avanzar escasos milímetros deja de propagarse ya que es una segunda grieta la que se propaga formando un ángulo aproximado de 10° con la horizontal. Esta segunda grieta deja de propagarse tras avanzar 2.3 mm. En la Figura 50 se observa claramente la aparición de deformación plástica (PEEQ en la leyenda) y en la Figura 51 un aumento de temperatura de 37 K, confirmando de nuevo el modo de fallo dúctil.

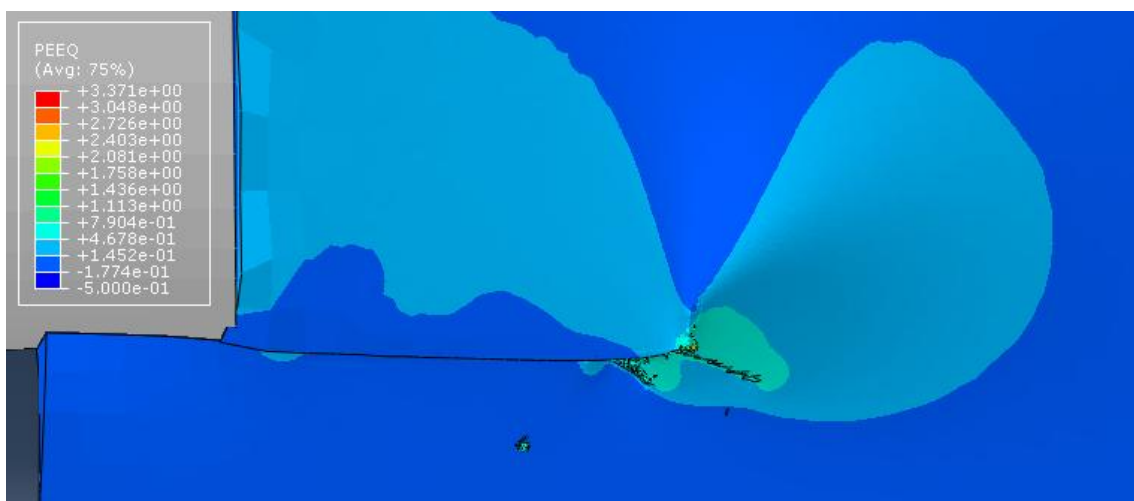


Figura 50. Deformación plástica caso B10_h0_V80

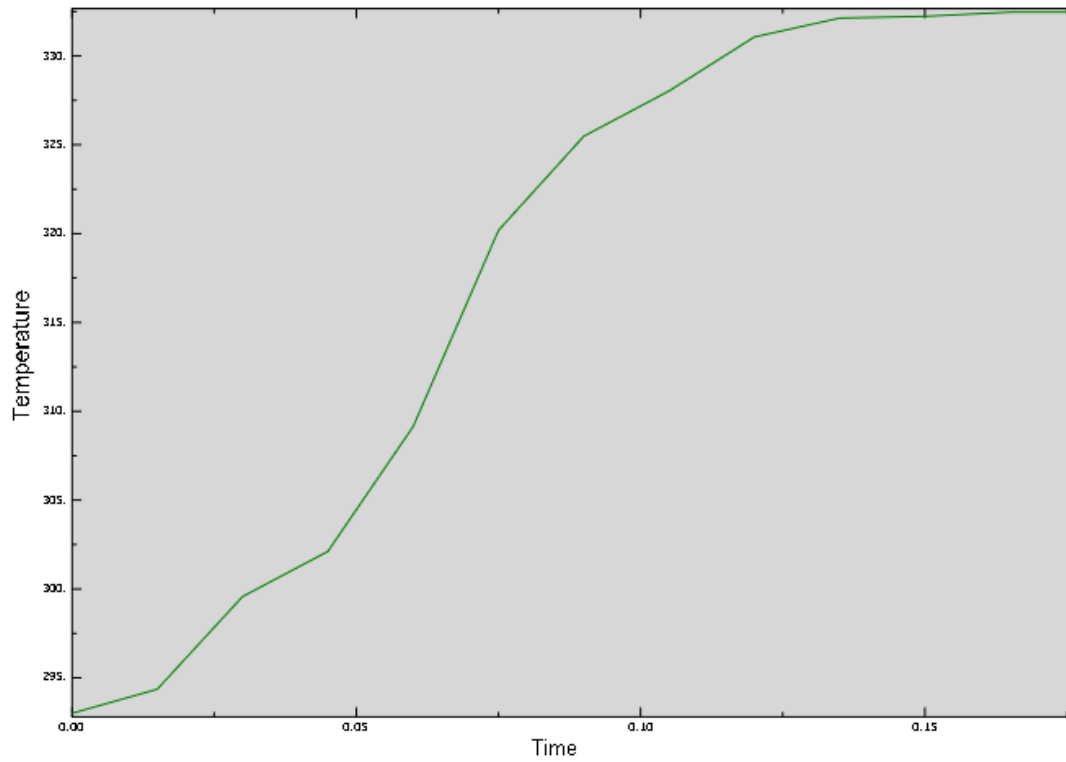


Figura 51. Variación de temperatura del elemento número 2006

6. CONCLUSIONES Y TRABAJOS FUTUROS

6.1. Conclusiones

Se ha realizado la simulación del impacto de un proyectil cilíndrico en placas de policarbonato con entalla simple. Para ello, se ha empleado el software comercial Abaqus, basado en el método de elementos finitos (MEF). Tomando como base los resultados de las simulaciones de los distintos casos se han podido obtener las siguientes conclusiones:

Relativo al modelo numérico

Se puede concluir que, cumpliendo con los objetivos del proyecto, se ha logrado un modelo numérico válido para el análisis del comportamiento del policarbonato frente a impacto.

Utilizando dicho modelo, se han reproducido cualitativamente los resultados de los ensayos experimentales realizados por Ravi Chandar en sus estudios [2] y [14], los cuales han servido para la validación del modelo.

Relativo a los distintos modos de fallo que aparecen en las placas de policarbonato

A través de la simulación de los distintos casos implementados en el modelo, se han podido diferenciar y analizar las particularidades de los distintos modos de fallo (frágil y dúctil) que aparecen en las placas de policarbonato con entalla simple:

- En los casos con modo de fallo frágil la grieta se propaga con ángulos de aproximadamente 70° con la horizontal, dirección en la que se alcanza la tensión principal máxima.
- En los casos con modo de fallo dúctil la grieta se propaga con ángulos de aproximadamente 10° con la horizontal, dirección en la que se alcanza la máxima deformación plástica y máximo aumento de temperatura.

Relativo a la influencia de los distintos parámetros del problema

En lo que respecta a la influencia del espesor de la probeta sobre los parámetros del problema se concluye que:

- A medida que aumenta el espesor de probeta disminuye notablemente la velocidad de deformación en el extremo de la entalla.
- Un mayor espesor de probeta dificulta la aparición de modo de fallo dúctil.
- En los casos con modo de fallo frágil, a medida que aumenta el espesor de la probeta se produce una disminución del ángulo de propagación de la grieta con la horizontal.
- En los casos con modo de fallo dúctil, para una misma altura de impacto, a medida que aumenta el espesor la longitud de grieta disminuye.

A su vez en lo que respecta a la influencia de la altura de impacto sobre dichos parámetros se concluye que:

- A medida que aumenta la altura de impacto disminuye considerablemente la velocidad de deformación en el extremo de la entalla.
- Una mayor altura de impacto, como consecuencia de la disminución de velocidad de deformación, dificulta la aparición de modo de fallo dúctil.
- En los casos con modo de fallo frágil, a medida que aumenta la altura de impacto se produce un aumento del ángulo de propagación de la grieta con la horizontal.
- En los casos con modo de fallo frágil se ha conseguido obtener las ecuaciones que determinan la relación entre velocidad de deformación en el extremo de la entalla y altura de impacto para cada espesor y velocidad de probeta.

Por último, en lo que respecta a la influencia de la velocidad de impacto sobre los parámetros del problema se concluye que:

- A medida que aumenta la velocidad de impacto aumenta notablemente la velocidad de deformación en el extremo de la entalla.
- Una mayor velocidad de impacto favorece la aparición de modo de fallo dúctil.
- Una elevada velocidad de impacto puede llegar a producir una fractura de la probeta en la zona de impacto del proyectil. Dicha fractura sería previa al fallo debido al efecto concentrador de tensiones en la entalla.

6.2. Trabajos futuros

Entre las posibles líneas de investigación y trabajos futuros relacionados con el presente estudio se encuentran los siguientes:

- Realización de un estudio numérico similar al desarrollado en el presente proyecto, sustituyendo el policarbonato por otro material termoplástico como por ejemplo el polimetilmetacrilato (PMMA). A través de este estudio se podría realizar una comparativa en cuanto al comportamiento frente a impacto de distintos materiales.
- Análisis de la influencia de la geometría de la entalla variando su longitud inicial y curvatura de la misma.
- Otra línea de investigación interesante sería el estudio de impactos con trayectorias distintas de proyectil, así como de impactos oblicuos y su influencia en el fallo de la probeta.
- Durante la simulación de los casos que se han visto en este proyecto se ha tomado una temperatura de referencia o temperatura ambiente de 293K. Sería interesante una variación de dicho valor para estudiar cómo afecta la temperatura ambiente al comportamiento del policarbonato.

7. BIBLIOGRAFÍA

- [1] R. Seldén, “Fracture energy measurements in Polycarbonate and PMMA”, *Polymer Testing*, vol. 7, pp. 209-222, 1987.
- [2] K. Ravi Chandar, “On the failure mode transitions in polycarbonate under dynamic mixed mode loading”, *Int. J. Solids Structures*, vol. 32, N°6/7, pp. 925-938, 1995.
- [3] O. Olabisi, “Handbook of thermoplastics”, *Plastics Engineering*, 2nd series, pp 609-619, 1997.
- [4] Charles E. Carraher, “Introduction to Polymer Chemistry”, CRC Press, 3rd edition, pp. 274-275, 2012.
- [5] C. Pérez Taboada, “Modelización constructiva de comportamiento de materiales compuestos para uso civil”, pp. 11-14, Universidad Politécnica de Catalunya, 2005.
- [6] D. Drucker and W. Prager, “Soil mechanics and plastic analysis or limit design”, *Quarterly of applied mathematics*, vol. 10, pp. 157-165, 1952.
- [7] E. Ghorbel, “A viscoplastic constitutive model for polymeric materials”, *International Journal of Plasticity*, vol. 24, pp. 2032-2058, 2008.
- [8] E. Arruda and M.C. Boyce, “A three-dimensional constitutive model oh the large stretch behavior of rubber elastic materials”, *Journal of Mechanics and Physics of Solids* 41.
- [9] M. Zyczkowski, “Discontinuous bifurcations in the case of the Burzynski-Torre yield condition”, *Acta Mechanica*, vol. 132, pp 19-35, 1999.
- [10] W. Burzynski, “Ueber die Anstrengungshypothesen”, *Schweiz Bauzeitung*, vol. 94, pp. 259-262, 1929.

- [11] R. N. Haward and G. Thackray, Proc. R. Soc. Lond. A302: 453, 1968.
- [12] A.D. Mulliken and M.C. Boyce, “Mechanics of the rate-dependent elastic-plastic deformation of glassy polymers from low to high strain rates”, International Journal of Solids and Structures 43, p.p. 1331–1356, 2006.
- [13] J. Lemaitre, “A continuum damage mechanics model for ductile fracture and their applications”, J. Engrg. Mat. Techn. 107, p.p. 83-89, 1985.
- [14] K. Ravi Chandar et al., “Failure mode transitions in polymers under high strain rate loading”, International Journal of Fracture 101, pp. 33–72, 2000.
- [15] J.F. Kalthoff, “Shadow optical analysis of dynamic shear fracture”, Optical Engineering. 27, pp. 835-840, 1988.
- [16] J.F. Kalthoff, “Transition in the failure behavior of dynamically shear loaded cracks”, Applied Mechanic Rev. 43, pp. 247-250, 1990.
- [17] Y. Lee and L.B. Freund, “Fracture initiation due to asymmetric impact loading of an edge cracked plate”, Applied Mechanic 57, pp. 104-111, 1990.
- [18] G. Buisson and K. Ravi Chandar, “On the constitutive behavior of polycarbonate under large deformation”, Polymer 31, pp. 2071–2076, 1990.
- [19] Shunqiang Fu et al., “Tension testing of polycarbonate at high strain rate”, Polymer Testing 28, pp. 724-729, 2009.
- [20] M. Dolinski and D. Rittel, “Modeling adiabatic shear failure from energy considerations”, Journal of the Mechanics and Physics of Solids 58, pp. 1759-1775, 2010.
- [21] G. Ciria, “Análisis numérico de la influencia de la excentricidad en un eje rotatorio fisurado”, pp. 20-24, Universidad Carlos III de Madrid, 2014.
- [22] Abaqus Users Manual, version 6.10-6.11. Dassault Systèmes, Simulia Corp., Providence, Rhode Island, USA, 2012.
- [23] J. Aranda y J.A. Loya, “Numerical analysis of the brittle-ductile transition in the failure-mode in polymeric materials”, Applied Mechanics and Materials, vol. 566, pp. 310-315, 2014.